This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

[redacted]

Despretz

PAE.

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE.

DE L'IMPRIMERIE DE PLASSAN, RUE DE VAUGIRARD, N° 15,
DERRIÈRE L'ODÉON.

Pages

Chaleur latente des vapeurs 111
Chaleur totale des vapeurs 113.
Force élastique des vapeurs 127.
Densités des vapeurs 135
Conductibilité 208
Combustion 783.
Respiration et chaleur animale 795.
Compression des Gaz 840.
Degagement de chaleur dans la compression des liquides 842.
Aiguille aimantée 842.
Décomposition des Sels par les métaux - effets galvaniques 842.

[redacted]

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE,

PAR C. DESPRETZ,

PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU COLLÉGE ROYAL D'HENRI IV,
RÉPÉTITEUR DE CHIMIE A L'ÉCOLE ROYALE POLYTECHNIQUE,
MEMBRE DE PLUSIEURS SOCIÉTÉS SAVANTES.

OUVRAGE

ADOPTÉ PAR LE CONSEIL ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE POUR L'ENSEIGNEMENT
DANS LES ÉTABLISSEMENS DE L'UNIVERSITÉ.

SECONDE ÉDITION,

REVUE ET AUGMENTÉE.

ASTOR LIBRARY
NEW-YORK

A PARIS,

CHEZ MÉQUIGNON-MARVIS, LIBRAIRE-ÉDITEUR,

RUE DU JARDINET, N° 13,

QUARTIER DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE.

1827.

[redacted]

A Messieurs

GAY-LUSSAC ET ARAGO,

Membres de l'Académie des Sciences, etc.

HOMMAGE

de l'Auteur.

L'ouvrage que je présente au Public est la rédaction du cours que je fais depuis plusieurs années au collége royal de Henri IV. J'en ai seulement retranché les notions générales que j'ai coutume de donner sur l'ensemble des phénomènes chimiques : on peut voir, dans la table, la distribution des matières. Je dirai, cependant, que j'ai adopté les six grandes divisions suivantes :

I. Notions générales sur la matière ; le mouvement et les machines simples ;

II. Histoire de la chaleur. — Théorie des gaz et des vapeurs. — Hygrométrie.

III. Atmosphère. — Baromètre. — Densités. — Pompes à air et à eau. — Machines à vapeur.

IV. Électricité. — Galvanisme. — Magnétisme. — Phénomènes électro-dynamiques.

V. Acoustique. — Optique.

VI. Météorologie. — Températures du globe. — Sources de chaleur.

La physique, étant composée de parties indépendantes les unes des autres, laisse beaucoup de liberté dans le choix de l'ordre à suivre dans son étude. Ainsi, quand on s'est occupé des propriétés générales de la matière, quand on a donné la théorie des gaz et des vapeurs, il est à peu près indifférent de commencer par l'optique, l'électricité ou l'acoustique. Il n'en est pas de même en chi-

mie, où le lien qui existe entre toutes les parties exige qu'on passe des combinaisons élémentaires aux combinaisons complexes.

La physique, telle qu'elle est cultivée aujourd'hui, est bien différente de cette physique scholastique, que les préceptes de Bacon et les exemples de Galilée ont tant contribué à bannir de l'enseignement public.

Déjà, du temps de Newton, les esprits supérieurs prenaient l'expérience pour base de leurs travaux, et l'on peut en citer pour preuve la décomposition de la lumière. Mais combien d'hommes de mérite subissaient encore le joug de l'ancienne routine ! Combien d'hommes distingués n'avaient d'autre guide que l'autorité des anciens maîtres ! C'est surtout depuis un demi-siècle que la physique a pris un nouvel essor ; c'est depuis cette époque que cette belle branche des connaissances humaines s'est enrichie de tant de brillantes découvertes, auxquelles, on peut le dire, les savans français ont pris la plus glorieuse part.

L'importance de la physique se fait sentir chaque jour davantage. Des notions générales sur cette science formeront désormais le complément nécessaire d'une bonne éducation. Outre que son étude donne à l'esprit des jeunes gens de la force et de la justesse, et les remplit des idées les plus sublimes de la puissance et de la sagesse du Créateur, elle leur fournit des méthodes expérimentales applica-

bles dans une infinité de circonstances, et des indications utiles même dans les usages ordinaires de la vie.

Je ne partage nullement l'opinion des personnes qui pensent que les livres élémentaires sont peu favorables aux progrès des sciences. Car il me semble que le moyen le plus certain de faire avancer une science, est d'augmenter le nombre des personnes qui la cultivent, en rendant sa première étude plus facile. Il y a d'ailleurs bien peu de sciences dont on ne puisse faire connaître, en un volume ordinaire, les principes et les faits d'où ils ont été déduits.

J'ai placé à la fin de mon ouvrage quelques chapitres sur des matières dont on s'est peu occupé dans les traités de physique : je veux parler de la météorologie, des températures du globe, et des sources de la chaleur animale; il m'a semblé que ces diverses parties étaient assez avancées pour entrer dans l'enseignement de la physique générale. Cette innovation, déjà introduite dans ma première édition, a reçu l'approbation des savans.

Il eût été bien difficile d'exposer les phénomènes de la pesanteur, la théorie et la construction des instrumens d'optique, sans faire usage des formules d'algèbre; je ne les ai employées que dans quelques circonstances très-rares, mais afin de ne pas arrêter les lecteurs peu familiers avec l'analyse, j'ai rejeté les calculs dans les notes.

Plusieurs savans, qui rendent aux sciences le double service de les enrichir de leurs découvertes, et d'aider de leurs lumières ceux qui les cultivent, ont bien voulu me donner des conseils. Quelques anciens élèves du collége de Henri IV, MM. Joly, Gouraud et Chauchot, distingués par leurs succès dans les concours généraux, m'ont secondé dans l'impression de cette seconde édition. M. Chauchot a refait avec beaucoup de soin tous les calculs numériques. Qu'il me soit permis de leur offrir ici l'expression de ma vive reconnaissance.

J'ai retouché tout mon ouvrage. J'ai développé plusieurs parties que j'avais simplement mentionnées dans la première édition. J'ai tâché de le rendre plus digne de l'accueil favorable que le public a bien voulu lui faire.

Paris, le 25 août 1827.

NOTA. *Le lecteur est prié de faire les corrections indiquées dans l'errata avant de commencer la lecture du texte.*

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES SUR LA MATIÈRE, LES LOIS DU MOUVEMENT ET LA CHUTE DES CORPS, ETC.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

1. On s'occupe spécialement en physique des changemens passagers que subissent les corps, soit par leur influence réciproque, soit par l'action de la lumière, de la chaleur, de l'électricité.

On appelle *corps* tout ce qui est susceptible de produire sur nos organes un certain nombre de sensations déterminées. L'expérience prouve que tous les corps peuvent être divisés en parties tellement petites, qu'elles échappent à nos sens. C'est à ces parties qu'on donne le nom de *particules*.

La faculté qu'a chaque corps d'exciter en nous des sensations diverses, constitue les propriétés particulières, par lesquelles nous en reconnaissons la présence. Parmi ces propriétés il en est quelques-unes qui appartiennent à

tous les corps, et c'est pour cela qu'on les a nommées générales. Telles sont l'étendue, l'impénétrabilité, la mobilité, la divisibilité, la porosité, l'inertie, la pesanteur et l'attraction. Toutes ces propriétés, quoique générales, ne sont pas essentielles à la matière. Nous admettons, avec plusieurs physiciens, que l'étendue et l'impénétrabilité sont les deux seules propriétés sans lesquelles on ne conçoit pas l'existence des corps.

2. *De l'Étendue.* — Tout corps occupe une portion de l'espace universel, c'est-à-dire que tout corps est étendu. Nous n'avons pas l'idée d'un corps sans y joindre celle de l'étendue.

Le volume d'un corps n'est autre chose que son étendue considérée relativement à la grandeur de ses dimensions. L'étendue du plus petit corps a toujours trois dimensions : longueur, largeur et profondeur.

3. *De l'Impénétrabilité.* — Deux corps quelconques ne peuvent occuper en même temps le même lieu de l'espace. C'est à cette propriété inhérente à la matière qu'on a donné le nom d'impénétrabilité.

La réunion de ces deux propriétés, l'étendue et l'impénétrabilité, suffit pour caractériser la matière.

Il est bon de prémunir le lecteur contre quelques exemples de pénétration apparente; une pointe d'acier qu'on enfonce dans le bois, en écarte les parties, mais ne le pénètre pas. Il en est de même de tout corps solide qui se meut dans les divers fluides.

Les combinaisons chimiques semblent, en général, indiquer la pénétrabilité. Par exemple, l'eau et l'alcool (esprit de vin), occupent, après leur mélange, un volume moindre que la somme des volumes de chacun de ces

deux liquides. La monnaie blanche, qui est composée d'argent et de cuivre, présente encore le même fait. Enfin, on peut aussi citer la combustion du charbon, qui a lieu dans l'air, sans en changer le volume. Dans ces diverses circonstances, la pénétration n'est qu'apparente, et on le concevra avec facilité si l'on remarque, comme l'observation va nous le faire bientôt connaître, que la porosité appartient à tous les corps, c'est-à-dire que leurs molécules laissent entre elles des interstices plus ou moins grands.

Ces interstices, dans les combinaisons chimiques, se trouvent occupés par les molécules des corps, de sorte que le volume d'un composé résultant d'une combinaison, peut être beaucoup plus petit que la somme des volumes des composans, sans que pour cela les substances qui ont obéi à leur affinité mutuelle pour former le composé, cessent d'être impénétrables.

Les autres propriétés générales des corps sont la porosité, la divisibilité, la mobilité, l'inertie, la pesanteur et l'attraction.

Ces propriétés appartiennent à tous les corps, mais nous les distinguons des deux précédentes, parce qu'elles ne sont pas une conséquence de l'existence de la matière.

4. *De la Porosité.* — Les molécules des corps ne sont pas en contact parfait; elles sont séparées par des espaces vides, variables en grandeur pour les différens corps. Ces espaces, qui ont reçu le nom de pores, sont en général remplis d'eau, d'air, ou de tout autre fluide dont la présence est rendue manifeste dans mille circonstances. Tout le monde sait que beaucoup de corps, la pierre à bâtir, le grès, le bois, quoique secs à leur surface extérieure, per-

dent ensuite plus ou moins de leur poids par une dessiccation prolongée, et cela à cause de l'évaporation de l'eau contenue dans leur intérieur.

Le sucre, jeté dans l'eau, se couvre de bulles aériennes, qui paraissent bientôt à la surface du liquide. L'air est déplacé par le liquide qui s'introduit dans les pores du sucre.

Dans certains corps, comme les métaux, le verre, le marbre, etc., la porosité ne peut être rendue aussi palpable que dans le grès, le sucre; mais elle n'existe pas moins, car tous ces corps augmentent de volume par la chaleur et se contractent par le froid, ce qui montre que les molécules de ces corps ne se touchent pas, puisqu'elles peuvent être plus ou moins rapprochées. On peut d'ailleurs, par l'application d'une forte pression sur un corps plongé dans un liquide, voir que ce liquide pénètre dans le corps, sans production d'aucune crevasse apparente.

On appelle *masse* d'un corps, la somme totale des parties matérielles qu'il renferme; et cette somme totale, prise sous un volume donné, est ce qu'on appelle *densité;* en sorte que la densité est le rapport de la masse au volume.

5. *De la divisibilité.* — L'observation apprend que tous les corps assez grands pour être palpables, sont susceptibles d'être divisés en plusieurs parties; que ces nouvelles parties peuvent être partagées en d'autres plus petites, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la division donne des particules tellement ténues, qu'elles échappent aux sens par leur petitesse.

Nous allons citer quelques exemples par lesquels on

peut juger de l'immense divisibilité de la matière. Un centigramme d'indigo donne une teinte bleue assez intense à 100,000 grammes d'eau; mais chaque gramme peut être facilement divisé en 1000 parties, de sorte qu'un centigramme d'indigo est divisible en 100 millions de parties. L'odorat, encore plus que la vue, nous prouve la grande divisibilité de la matière. Une goutte d'essence de térébenthine répand son odeur dans un vaste appartement; l'odeur d'une substance, connue sous le nom de musc, se fait sentir dans une chambre spacieuse, pendant plusieurs années, sans que le poids en soit sensiblement diminué; cependant le renouvellement de l'air emporte les particules odorantes qui se dégagent sans cesse, puisque la chambre en est continuellement remplie.

La ductilité et la malléabilité des métaux offrent aussi des exemples d'une bien grande divisibilité. Le batteur d'or réduit ce métal en feuilles tellement légères, que le moindre souffle les met en mouvement. L'or et le platine sont réduits, à l'aide de la filière, en fils d'une ténuité extrême. Avec un gramme de l'un de ces métaux on ferait un fil de plusieurs mille mètres de longueur. C'est peut-être le lieu de faire connaître le procédé ingénieux qu'a imaginé M. Wollaston, pour donner aux fils de platine un degré de finesse que jamais le procédé de la filière ne pourrait atteindre. Ce procédé consiste à fixer dans l'axe d'un cylindre creux, un fil de platine déjà fin, à l'envelopper d'argent; ce qui se fait en y versant ce dernier métal en fusion. Le fil de platine ainsi enveloppé d'argent est passé de nouveau à la filière, l'argent qui le recouvre est dissout ensuite par l'acide nitrique, et le fil de platine reste intact. Nous verrons l'utilité de pareils fils, en traitant de l'optique.

6. *De l'Inertie.* — Tous les corps persévèrent dans l'état de mouvement et de repos où ils se trouvent. On a donné le nom d'inertie à ce défaut d'aptitude qu'ont tous les corps d'apporter d'eux-mêmes le plus petit changement à leur état actuel.

L'inertie à l'état de repos (1) est offerte par une observation constante; jamais on n'a vu un corps en repos se mettre de lui-même en mouvement. Un exemple remarquable de l'inertie dans l'état de mouvement, se présente dans le cours des planètes. La vitesse de la lune autour de la terre, celle de la terre autour du soleil, ne paraissent pas avoir diminué depuis l'origine des observations astronomiques.

Si à la surface de la terre nous ne voyons pas les corps abandonnés à eux-mêmes, conserver long-temps les vitesses qu'ils ont acquises, c'est que leur mouvement est bientôt détruit par la résistance de l'air et des autres corps. Les planètes, au contraire, se mouvant dans le vide, restent animées des mêmes vitesses qui leur ont été imprimées.

7. *De l'Attraction.* — Dans beaucoup de circonstances on voit les corps se porter les uns vers les autres, sans qu'il existe aucune cause sensible de ce mouvement : on a désigné cette tendance mutuelle par le mot d'attraction. Il faut se rappeler qu'on entend par là exprimer le fait et non la cause.

---

(1) Ce n'est que par une abstraction que nous considérons l'état de repos; car il n'y a pas une particule en repos dans l'univers. La terre, les planètes, se meuvent autour du soleil; le soleil lui-même a un mouvement sur son axe.

L'attraction s'exerce entre les corps à distances insensibles ; c'est par cette espèce d'attraction, qui prend alors le nom d'*attraction moléculaire*, d'*affinité*, de *cohésion*, qu'on explique les phénomènes chimiques, et plusieurs phénomènes que la physique considère.

L'attraction s'exerce aussi à des distances considérables; elle porte alors plus spécialement le nom de *gravitation*. Ainsi le soleil attire tous les corps renfermés dans l'univers, et réciproquement il est attiré par eux. L'intensité de cette action est proportionnelle aux masses, et en raison inverse du carré des distances. L'attraction totale qu'exerce un corps doit être la somme des attractions particulières exercées par les molécules dont ce corps est l'assemblage. Quant à la loi de la variation de l'intensité de la force avec la distance, Newton l'a découverte en cherchant l'espace que parcourrait la lune dans un instant déterminé, si elle était abandonnée à l'action seule de la terre; et il vit ensuite, en comparant cet espace à celui que les corps parcourent dans le même instant à la surface de la terre, que l'intensité de la pesanteur ou de l'attraction de la terre décroissait comme le carré de la distance. Les calculs qui ont conduit Newton à la découverte de cette belle loi de la nature sont d'un ordre trop élevé pour qu'on les rapporte ici.

Une sphère attire un point matériel placé à sa surface ou hors de sa surface avec la même intensité que si toute la matière était réunie à son centre : on démontre ce théorème par la géométrie. Nous l'admettrons comme un fait. On le conçoit d'ailleurs facilement; car soit un point *a* (*fig.* 1) placé hors de l'enveloppe *dd' hk*; si toute la matière est ramenée à son centre, la diminution de l'intensité causée par l'éloignement, relativement au point *a*, des

[illegible] sera compensée
[illegible] que renferme
[illegible] sphère peut être con-
[illegible] affinité d'enveloppes
[illegible] position paraîtra fon-
[illegible] que des notions très-

[illegible] du globe ne manifestent
[illegible] l'un vers l'autre, parce que
[illegible] la terre les dérobe à l'effet
[illegible]. Mais on peut, comme l'a fait
[illegible] en évidence l'attraction mu-
[illegible] La partie principale de l'appareil
[illegible] physicien, est un levier hori-
[illegible] fil métallique vertical non tordu (*fig.*
[illegible] portait à chacune de ses extrémités une pe-
[illegible] que; un globe de plomb d'environ un
[illegible] près de chacune des boules, de manière à
[illegible] des deux globes conspirassent pour faire
[illegible] dans le même sens les deux bras du levier. Quand
[illegible] bien posé, l'action des globes de plomb sur les
[illegible] boules se manifesta par un mouvement sensible
[illegible] du levier.

[illegible]dish, connaissant le volume et la densité des
[illegible] et des globes de plomb, et le volume du globe ter-
[illegible] put, par la comparaison du mouvement du levier
[illegible] mouvement qu'imprime la pesanteur à un pendule,
[illegible] à connaître la densité moyenne du globe ter-
[illegible], qu'il trouva égale à 5, 5.

[illegible] *D. la Pesanteur.* — Aucun corps à la surface du
[illegible] ne paraît dénué de pesanteur, c'est-à-dire de cette

propriété de se précipiter vers le centre de la terre. Cette propriété n'est pas une condition essentielle à l'existence des corps; cependant comme la matérialité et la pesanteur paraissent toujours s'accompagner, l'existence de l'une suffit pour juger par induction de l'existence de l'autre. Ainsi, nous ne pouvons ni voir ni toucher l'air atmosphérique; cependant il nous est permis de juger que c'est une substance matérielle, puisqu'il est pesant et qu'il produit beaucoup de phénomènes semblables à ceux qui sont produits par les corps dont la matérialité peut être constatée.

Du Mouvement.

9. On appelle mobilité la faculté qu'a un corps d'être transporté d'un lieu dans un autre. Cette propriété appartient à tous les corps de la nature, puisqu'il n'y a pas de corps qui ne puisse être mis en mouvement par une cause quelconque qu'on nomme force.

Le plus simple de tous les mouvemens est celui qui se fait en ligne droite, et dans lequel la vitesse (l'espace parcouru pendant l'unité de temps) est constante. Le mouvement d'une montre bien réglée est uniforme; l'espace parcouru par l'aiguille est toujours le même pendant le même temps. Dans le mouvement uniforme, l'espace parcouru est égal à la vitesse multipliée par le temps. La formule de ce mouvement est $E = V\ T$.

La vitesse peut être variable : c'est le cas du mouvement varié. Dans le mouvement uniformément varié, qui est le seul que nous considérions ici, la vitesse croît ou décroît de quantités égales en temps égaux. Les forces qui produisent cette espèce de mouvement, sont appelées forces accélératrices ou retardatrices. Dans le cas du mouve-

ment accéléré, si le corps est animé à l'origine d'une vitesse représentée par A, et si dans chaque unité de temps la force accélératrice ajoute à cette vitesse une quantité constante g, elle deviendra successivement $A+g$; $A+2g$..; $A+gt$, ce qui exprime que la vitesse croît proportionnellement au temps.

10. Voyons comment croît l'espace, par rapport au temps, en supposant la vitesse nulle à l'origine ou $A=o$. Soit AF (*fig.* 1*ter*) la ligne représentant le temps, divisée en un certain nombre de parties égales entre elles et à l'unité de temps. Supposons que les lignes Bp, Cm, Dl..., élevées perpendiculairement sur la ligne AF, représentent les vitesses acquises après chaque unité de temps, l'espace total parcouru sera la somme des espaces partiels : il sera toujours possible de prendre une unité de temps assez petite pour que la vitesse soit sensiblement constante. L'espace parcouru dans ce cas, sera le produit du temps par la vitesse; si maintenant l'on donne au mobile, dès l'origine du mouvement, les vitesses Bp, Cm, Dl, etc., qu'il n'a acquises qu'à la fin de chaque unité, l'espace total parcouru sera la somme des rectangles $ABpn$, $BCmz$, $CDlx$, etc. Si au contraire on suppose qu'il se meuve dans chaque unité de temps avec la vitesse qu'il a dès l'origine, alors la somme des espaces parcourus sera zéro, $BCqp$, $CDrm$, etc. La première supposition donne un résultat trop fort; la seconde, un résultat trop faible : la différence sera d'autant plus petite que l'unité de temps sera moindre. On voit d'ailleurs que leur limite est le triangle AFH; l'espace total parcouru pendant le temps AF, sera donc égal à $\frac{AF \times FH}{2}$; et comme FH

est la vitesse finale égale à $T\,g$, l'expression de l'espace parcouru deviendra $\frac{T \times Tg}{2} = \frac{g\,T^2}{2}$; ainsi, dans le mouvement uniformément varié, *les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps.*

D'où il résulte que les deux formules du mouvement uniformément varié, sont $V = g\,T$, et $E = \frac{g\,T^2}{2}$ (a).

V, est la vitesse acquise au bout d'un certain temps T.

E, est l'espace parcouru pendant le même temps. Si l'on fait $T = 1$ dans la formule (a), on obtient $g = 2\,E$, c'est-à-dire que dans le mouvement uniformément accéléré, *la vitesse acquise après l'unité de temps est double de l'espace parcouru pendant cette unité.* C'est pour plus de simplicité, que nous avons supposé la vitesse du mobile nulle à l'origine; ce cas mérite surtout de fixer notre attention, parce que la chute des corps va bientôt nous en offrir une application.

Si la vitesse n'était pas nulle à l'origine, rien ne serait plus simple que de tenir compte d'une vitesse imprimée par une impulsion primitive. Soit A cette vitesse : la vitesse totale du corps, soumis à la fois à cette impulsion et à l'action d'une force accélératrice constante, serait $A + g\,T$ au bout du temps T. Pour avoir l'espace parcouru, il faudrait ajouter les deux espaces séparés; or, en vertu de l'impulsion primitive, l'espace parcouru d'un mouvement uniforme, serait $A\,T$; mais nous venons de voir que la force accélératrice seule fait parcourir un espace $\frac{g\,T^2}{2}$, donc l'espace total serait représenté par $AT + \frac{g\,T^2}{2}$.

[illegible]que, quantité de mouvement le [illegible] sur la vitesse $M \times V$; en sorte [illegible] mouvement de deux corps sont les [illegible] sont en raison inverse de leurs [illegible] même force appliquée à des corps [illegible] des vitesses en raison inverse de ces [illegible] vérifie par la machine d'Athood.

[illegible]*cation à la Pesanteur.*

[illegible] avant Galilée que la vitesse communi- [illegible]anteur, à différens corps, était différente [illegible] ou le volume de ces corps. Cette opinion [illegible] ce que la chute des corps très-pesans est [illegible] celle des corps légers. Galilée fit voir que [illegible] était due à la résistance de l'air. Pour cela, il [illegible] du haut de la tour de Pise quatre boules [illegible] volume, d'or, de plomb, d'ivoire et de liége; et [illegible] que la boule d'or, qui était la plus pesante, [illegible] la première à terre, et que la boule de liége, qui [illegible] plus légère, arrivait la dernière; mais que le retard [illegible] boule de liége était tel, qu'elle était à quelques pieds [illegible] arrière, lorsque la boule d'or touchait la terre. Ce [illegible] philosophe en conclut avec raison que ce retard ne [illegible] pas être attribué à une différence d'action dans la pesanteur, mais bien à la résistance du milieu dans lequel se faisait le mouvement; la résistance de l'air est ici la même pour toutes les boules, parce qu'elles lui présentent la même surface : mais cette force, toujours la même, produisant une plus grande diminution de vitesse sur les corps les plus légers, ils doivent tomber moins rapidement dans l'air.

On peut d'ailleurs vérifier directement que *l'action de la pesanteur* imprime *la même vitesse à tous les corps;* pour cela il suffit de faire tomber dans un tube de verre de six pieds de longueur, qu'on a préalablement vidé d'air, des cercles de plomb, de bois et de papier, et on observe que dans leur chute ces corps sont toujours ensemble. Quand on a constaté ce résultat, on voit, si on laisse rentrer l'air peu à peu, ces corps différer de plus en plus dans leur vitesse.

12. Le mouvement des corps pesans abandonnés à l'action de la terre, doit être uniformément accéléré, car d'abord l'action de la terre est continue; ensuite elle est sensiblement constante dans son énergie, puisque les espaces parcourus à la surface de la terre sont très-petits en comparaison des distances de ces corps à son centre (1).

Un corps libre, soumis à l'action seule de la terre, reçoit à chaque instant la même impulsion; sa vitesse s'accroît de la même quantité, et son mouvement est uniformément accéléré. Il ne reste plus qu'à soumettre ces conséquences à l'épreuve de l'expérience; or, deux choses

---

(1) Nous avons déjà dit que l'action d'une sphère sur un point placé à sa surface est la même que si toute sa masse était réunie à son centre. La terre (*fig.* 2 *bis*) agit sur un corps m à la distance $c\,m$. S'il était placé sur la surface en r, la distance serait $c\,r$; en sorte que si g représente l'action de la terre à la distance $c\,r$, c'est-à-dire à la surface, elle deviendrait $g\frac{c\,r^2}{(c\,r+r\,m)^2}$ à la distance $c\,m$. Or, comme $r\,m$ est très-petit relativement au rayon de la terre, $\frac{c\,r}{c\,r+r\,m}$ est sensiblement égal à l'unité. La force attractive est donc à peu près la même pour toutes les observations que nous faisons dans un même lieu à la surface de la terre.

s'opposent à ce qu'on fasse des expériences directes dans la verticale; la résistance de l'air et la rapidité de la chute qui est telle, qu'un corps parcourt à Paris, dans la première seconde, un espace égal à $4^m,9$; mais il est possible de lever ces difficultés. On affaiblit considérablement l'obstacle apporté par la résistance de l'air, et on rend l'observation plus facile en ralentissant le mouvement. Or, il est visible que la nature du mouvement accéléré est tout à fait indépendante de la valeur absolue de la force accélératrice; elle ne dépend uniquement que de la continuité de son action et de la constance de son énergie.

13. Nous ferons tomber, comme l'a fait Galilée, les corps sur un plan incliné (*fig.* 2), sur lequel la pesanteur étant g dans la verticale, est réduite à $g \times \frac{AB}{AC}$; de sorte qu'on est le maître de ralentir la vitesse autant qu'on le désire, par un plan plus ou moins incliné. En divisant la ligne AC en parties égales, et laissant tomber le corps du point A, d'abord pendant 1 seconde, ensuite pendant 2, 3, on reconnaîtra que les nombres de divisions parcourues, sont comme ... 1, 4, 9... c'est-à-dire que les espaces 1, 4, 9, 16..., parcourus, sont proportionnels au carré des temps 1, 2, 3, 4, etc. (1re proposition vérifiée.)

Tableau comparatif des résultats dans la verticale et sur un plan incliné, dont la hauteur A B *est le sixième de la longueur* A C.

TEMPS.	ESPACES PARCOURUS.	
	Verticale.	Plan incliné.
1″	4m, 9	0m, 81
2″	19, 6	3, 24
3″	44, 1	7, 29

14. Dans le mouvement uniformément accéleré, la vitesse croît proportionnellement au temps; voyons s'il en est de même dans la chute des corps. Si, au bout d'un temps quelconque, la force accélératrice cesse d'agir, le corps continuera à se mouvoir avec une vitesse qui lui fera parcourir dans le même temps un espace double de celui qui a été déjà parcouru, ce qui se déduit facilement des formules du n° 10. Le tableau précédent offre le même rapport : en effet, l'espace parcouru dans deux secondes est composé : 1° de l'espace 0^m, 81 parcouru dans la première seconde; 2° d'un espace égal dans la deuxième seconde, en vertu de la même action : il faut donc que l'espace parcouru en vertu de l'effet inconnu de la vitesse acquise soit égal à 2 fois 0, 81, puisque l'espace total dans deux secondes est quadruple de 0, 81. Si l'on calcule de la même manière les vitesses acquises après 2, 3, 4, etc., secondes, on verra qu'elles suivent la progression 2, 3, 4, etc., c'est-à-dire que, *dans la chute des corps, les vitesses croissent proportionnellement aux temps.* (Deuxième proposition vérifiée.)

15. Un mécanicien anglais nommé Athood a imaginé une machine (*fig.* 4) qui est aujourd'hui employée pour la démonstration expérimentale de la loi de la chute des corps. La partie principale de cette machine ingénieuse est un fil de soie, aux extrémités duquel sont fixées des masses égales m et m' de 3 à 400 grammes. Le fil roule sur une roue dont le mouvement est rendu très-facile par une disposition particulière qui consiste à faire reposer son axe sur d'autres roues également mobiles; une horloge H est fixée à la machine. Si l'on met les deux masses en mouvement, en les poussant par exemple avec la main; après

qu'on aura cessé d'agir sur elles, elles resteront, en vertu de leur inertie, dans l'état de mouvement dans lequel on les aura mises, et le mouvement sera nécessairement uniforme. Si l'on augmente l'une des deux masses prises à l'état de repos, d'un poids additionnel, l'action de la pesanteur s'exerçant sur cette masse additionnelle, la déterminera à descendre, et même lui imprimera un mouvement accéléré; mais comme elle doit entraîner dans sa chute les deux masses auxquelles elle est liée, son mouvement sera ralenti dans le rapport de sa masse propre à la somme actuelle des masses : de sorte que si les deux masses primitives sont égales à m, et que celle du poids additionnel soit égale à p, la vitesse sera réduite dans le rapport $\frac{p}{2m+p}$. En affaiblissant la vitesse, on atténue l'influence des causes d'erreur apportées par la résistance de l'air et par la trop grande rapidité du mouvement.

On pourra répéter avec cet appareil les expériences que nous avons indiquées pour le plan incliné. On constatera d'abord que *les espaces parcourus sont proportionnels au carré des temps;* on vérifiera également la progression d'intensité des vitesses acquises à diverses époques du mouvement. A cet effet, on donne à la masse additionnelle la forme d'une lame oblongue; la longueur de cette lame dépasse le diamètre d'un anneau a placé le long de la règle verticale sur laquelle se comptent les espaces, de sorte que la masse additionnelle est retenue par cet anneau, et le mouvement devient uniforme en vertu de la vitesse acquise : on trouve que cette vitesse est telle, que le corps parcourt, *dans un temps égal à celui pendant lequel le mouvement avait été accéléré,* un espace *précisé-*

ment double; et en plaçant l'anneau de manière que le mouvement uniforme soit produit successivement après 2, 3, 4, ..., secondes, on trouve que les vitesses sont absolument dans le même rapport.

TABLEAU DES ESPACES PARCOURUS.

Durée de la chute.	Chute libre dans la verticale.	Somme des masses 105 gr.: masse additionnelle $\frac{1}{2}$ gr. Espaces parcourus.	Somme des masses 105 gr.: masse additionnelle $\frac{1}{4}$ gr. Espaces parcourus.
1''	4,m9	0,m0116	0,m0058
2''	19, 6	0, 0464	0, 0232
3''	44, 1	0, 1044	0, 0522

La première colonne renferme le temps de la durée de la chute; les trois autres représentent les espaces parcourus : les nombres de chacune de ces colonnes ont entre eux le même rapport que les carrés des nombres de la première.

TABLEAU DES VITESSES ACQUISES,

CORRESPONDANTES AU TABLEAU PRÉCÉDENT.

Après.			
1''	9,m8	0,m0232	0,m0116
2''	39, 2	0, 0928	0, 0464
3''	88, 2	0, 2088	0, 1044

Ces résultats montrent aussi que deux forces inégales appliquées à une même masse lui impriment des vitesses qui leur sont proportionnelles. Des expériences analogues montreraient qu'une même force appliquée à deux masses inégales leur communique des vitesses en raison inverse de ces masses.

16. En éliminant le temps T entre les formules $V = gT$ et $E = \frac{gT^2}{2}$, on obtient pour la vitesse une expression tout à fait indépendante du temps, égale à $V = \sqrt{2Eg}$, qui, traduite en langage ordinaire, indique que, pour

avoir la vitesse après un certain temps, il faut *multiplier le double de l'espace parcouru par la valeur de g ou* 9,809, *et extraire la racine carrée du produit.*

On peut tirer de là une remarque importante, c'est que, si plusieurs corps partent d'une même hauteur *A B*, et suivent des chemins différens *A D*, *A C*, *A B*, ils auront à la fin de la chute, aux points *C*, *D* et *B*, la même vitesse (*fig.* 3); ce qui se voit aisément en substituant successivement à *g*, valeur de la pesanteur dans la verticale, sa valeur sur les plans inclinés *A C* et *A D*. On aura la même valeur pour la vitesse acquise aux points *C*, *D* et *B*. *Voyez* le n° 13 pour l'expression de la pesanteur sur le plan incliné.

17. Il ne sera pas inutile de dire un mot du mouvement retardé; on en a un exemple dans le mouvement d'un corps lancé de bas en haut en vertu d'une impulsion primitive. La pesanteur, étant dirigée en sens contraire de la vitesse d'impulsion, la vitesse finit par être nulle, et le corps en repos sollicité par la pesanteur seule retombe vers la terre. Maintenant, quelle vitesse faut-il imprimer à un corps pour le lancer à une hauteur donnée? Il est visible qu'il faut lui imprimer la vitesse qu'il acquerrait en tombant de la même hauteur, c'est-à-dire $\sqrt{2gh}$. Ainsi un corps lancé de bas en haut parviendrait à 2500 mètres, s'il avait une vitesse de $\sqrt{2.\ 2{,}500.\ 9{,}8}$, ou $221^{m}{,}31$ par seconde.

Du mouvement curviligne.

18. Pour bien concevoir le mouvement curviligne, il est nécessaire de connaître la règle du parallélogramme des forces, d'après laquelle la résultante de deux for-

ces quelconques appliquées en un même point, et représentées par des droites prises sur leurs directions à partir de ce point, est représentée en grandeur et en direction, par la diagonale du parallélogramme construit sur les deux lignes proportionnelles à ces forces.

Si donc AB et AC (*fig.* 5) sont les lignes qui représentent deux forces p et q appliquées au point A, on construira sur AB et AC le parallélogramme $ABCD$, et la diagonale AD sera la résultante des deux forces p et q.

Cette règle est vraie, quel que soit le rapport des forces; qu'elles soient commesurables ou incommesurables, c'est la même construction.

Supposons qu'en D une force dont l'intensité est représentée par DF agisse dans la direction DK, le mobile sera maintenant soumis à l'action de la résultante AD et de la nouvelle force DF; pour trouver la direction et la valeur de la résultante, il faudra construire sur DF et $DE = AD$, le parallélogramme $FDEH$, dont la diagonale DH sera résultante des trois forces AB, AC, DF; on continuerait la même construction pour composer un nombre quelconque de forces. Si les instans auxquels ces différentes forces exercent leur action sont de plus en plus rapprochés, le polygone se changera en une courbe qu'on nomme *trajectoire*.

Ces notions, quoique très-succintes, suffiront pour rendre plus facile la conception de ce que nous dirons sur la projection des mobiles, sur la force centrifuge et sur le pendule.

19. Le mouvement d'un corps lancé dans une direction oblique à l'horizon, présente un exemple très-simple du mouvement curviligne (*fig.* 7). Le corps pesant m, lancé

dans la direction $m\,q$ par une cause quelconque, la suivrait avec une vitesse constante sans l'action de la pesanteur : de sorte qu'après le premier instant, il serait éloigné à une distance m 1 ; après le second instant, à une distance m 2 double, et ainsi de suite. Le même mobile, soumis seulement à la pesanteur, suivrait la loi ordinaire de l'accélération des corps pesans; après le premier instant, il serait (sur la ligne $m\,p$) à une distance m 1 ; après le second instant, à la distance m 4 quadruple; après le troisième, à une distance m 9 neuf fois plus grande, etc. : donc, en vertu des deux forces, il se trouvera, après les 1re, 2e, 3e unités de temps, en m', m'', m''', etc.; et la suite de ces points formera une courbe qui, ayant les ordonnées proportionnelles aux carrés des abscisses, sera la parabole.

Les bombes lancées par l'explosion de la poudre, décrivent des courbes paraboliques : le point le plus élevé H est la hauteur du jet; l'espace $M\,K$ en est l'amplitude. (La forme parabolique n'est pas toutefois exacte, parce que la résistance de l'air altère le mouvement. (*fig.* 7 *bis.*)

De la Force centrifuge.

20. Soit un point matériel m (*fig.* 6) attaché à un point fixe c, par un fil inextensible $c\,m$. Supposons de plus qu'on lui imprime une vitesse quelconque dans la direction $m\,F$, perpendiculaire à la longueur du fil. Si ce point m n'est soumis à aucune force accélératrice, il décrira un cercle dont le centre sera en c et dont le rayon sera $c\,m$. Le fil éprouvera, pendant le mouvement, une tension, dans le sens de sa longueur; c'est cette tension qui est la force *centrifuge*. On pourra faire

abstraction du fil, et considérer le mobile comme libre, si on lui applique une force égale et opposée à la tension. C'est par la combinaison de cette force *centrale* et de l'effet de l'impulsion primitive que le cercle est décrit.

Si l'on appelle f l'intensité de la force centrale, on peut regarder cette force comme constante en grandeur et en direction pendant un temps infiniment petit θ; ainsi, pendant que le mobile parcourt l'arc $m'm$, la force centrale est parallèle au rayon mc; de sorte que, si la force centrale agissait seule sur le mobile, elle lui ferait parcourir l'espace ms. Or, en vertu de la formule $e = \frac{gt^2}{2}$ du n° 10, on a $g = \frac{2e}{t^2}$: on aura donc aussi $f = \frac{2ms}{\theta^2}$; mais d'après une propriété connue du cercle, $ms = \frac{m'm^2}{2mc}$; remplaçant ms par sa valeur, on a $f = \frac{m'm^2}{\theta^2 mc}$; et puisque le mouvement circulaire est uniforme, $\frac{mm'}{\theta}$ ou l'espace divisé par le temps, représente la vitesse. Dans cette circonstance, on peut prendre l'arc pour la corde, à cause de la petitesse de ce premier. La valeur de f devient donc $f = \frac{v^2}{r}$; c'est-à-dire que la force centrifuge dans le cercle est égale au carré de la vitesse divisé par le rayon.

Ceci explique pourquoi, par un mouvement rapide donné à un fil terminé par une masse pesante, on finit par le rompre si l'on augmente successivement la vitesse de l'impulsion : on remarque en même temps que le corps en li-

berté s'échappe par la tengente $M F$; la fronde en est un exemple.

De ce qui précède on peut déduire que, dans une courbe quelconque, la force centrifuge a pour mesure le carré de la vitesse divisé par le rayon du cercle osculateur, parce qu'on peut toujours supposer la coïncidence de la trajectoire, en chaque point d'une étendue infiniment petite, avec son cercle osculateur en ce point.

Nous allons chercher une autre expression de la force centrifuge qui ne renfermera plus la vitesse, et dans laquelle nous introduirons le temps T d'une révolution entière. Nous y parviendrons par l'élimination de la vitesse v entre la valeur précédente $f = \frac{v^2}{r}$ et l'équation $2 \pi r = v T$, nous trouverons, de cette manière, $f = \frac{4 \pi^2 r}{T^2}$ (1).

Cette dernière expression nous fait voir que la force centrifuge est en raison directe du rayon et en raison inverse du carré du temps employé pour une révolution entière.

Cette expression nous sera utile pour l'évaluation numérique de la force centrifuge en un point quelconque de la surface de la terre.

21. On réalise, dans les cabinets de physique, plusieurs effets de la force centrifuge. Par exemple : on en-

---

(1) Si T est le temps nécessaire au mobile pour qu'il parcoure la circonférence entière $2 \pi r$, on aura $2 \pi r = v T$, puisque le mouvement est uniforme, et mettant la valeur de v tirée de cette équation dans l'expression $f = \frac{v^2}{r}$, on a $f = \frac{4 \pi^2 r}{T^2}$.

file par une baguette de fer *AB* (*fig.* 7 *ter*), quelques boules d'ivoire, on fait ensuite tourner avec force l'appareil sur un pivot *CD*; on remarque 1°. qu'une boule, placée au milieu, y reste en repos malgré la rapidité de la rotation; en effet, si cette boule est exactement au centre, les différentes parties étant sollicitées en sens contraire, leurs actions doivent se détruire; 2°. qu'une boule placée hors du centre glisse le long du fil et va frapper l'extrémité de la barre.

On peut faire une expérience semblable avec les liquides (*fig.* 8) : *ABC* représente un tube de verre coudé, rempli en partie de liquide; on voit que ce liquide est poussé vers les extrémités *A* et *C* par l'effet de la force centrifuge; de plus, si l'on y met des corps différens en densité, par exemple de l'eau, de l'huile d'olive, des balles de plomb et de liége; les corps les plus pesans seront aux points les plus hauts du tube.

22. La terre a un mouvement de rotation sur son axe, les corps placés à sa surface participent à ce mouvement. Voyons comment la force centrifuge affaiblit la gravité. D'après la dernière expression (n° 20), la force centrifuge est proportionnelle au rayon du cercle, le temps de la révolution étant le même; il en résulte qu'à l'équateur où le rayon est plus grand, la force centrifuge est plus considérable, et les corps doivent avoir une pesanteur moindre, ce qui est confirmé par l'observation. Il est curieux de voir le rapport entre la force centrifuge et la pesanteur à l'équateur. Le rayon de la terre à l'équateur est égal à 6,376,464 mètres. Le temps d'une révolution entière du globe est de 86,164 secondes.

La substitution de ces valeurs et de la valeur de π (rapport

de la circonférence au diamètre = 3,14159), donne f = $0^m,0339$; la force centrifuge imprime dans la première seconde une vitesse de $0^m,0339$; or la vitesse déduite des observations est $9^m,78$; il est visible que ce n'est là que la différence entre la gravité réelle et la force centrifuge; en ajoutant donc à ce nombre 9,78 la valeur de la force centrifuge $0^m,0339$, on aura $9^m,8134$ pour la gravité totale, et divisant ce nombre par $0^m,0339$, le quotient sera 289, ce qui montre qu'à l'équateur la force centrifuge est $\frac{1}{289}$ de la gravité; nous avons vu que la force centrifuge croissait comme le carré de la vitesse; ainsi puisque 289 est le carré de 17; si le mouvement de rotation de la terre devenait 17 fois plus rapide, la force centrifuge serait 289 fois plus considérable, elle égalerait la gravité, et les corps à l'équateur seraient sans pesanteur. La gravité est ainsi combattue par la force centrifuge dans tous les points de la surface de la terre; mais cette dernière diminue de l'équateur aux pôles, parce que le rayon du cercle décrit devient moindre, et ensuite parce que la force centrifuge devient de plus en plus oblique à la direction de la pesanteur, qui est toujours perpendiculaire à la surface de la terre (1).

On attribue en général à l'action de la force centrifuge, la forme de la terre et des autres corps célestes, qui tous sont, comme elle, renflés vers leur équateur, et aplatis vers leurs pôles. Il est vrai que pour cela il faut admettre que ces différens corps ont été primitivement fluides ou

(1) g étant la pesanteur à l'équateur, l représentant la latitude d'un lieu, l'intensité g' de la pesanteur dans ce lieu est égal à $g' = g\,(1 - 0{,}00284 \cos 2l)$.

dans un état de grande mollesse; la force centrifuge, s'exerçant avec plus d'énergie à l'équateur, a dû y déterminer l'accumulation d'une plus grande quantité de matière. On rend ce phénomène sensible au moyen d'un appareil fort simple (*fig.* 9). Cet appareil consiste en un ressort d'acier, circulaire, et percé par un diamètre *H K*. On donne un mouvement de rotation à l'axe; le cercle d'acier est entraîné dans le même sens, se renfle à l'équateur et s'applatit aux pôles *H* et *K*, et d'autant plus, que la vitesse de rotation est plus considérable.

On peut encore réaliser le phénomène d'une autre manière : qu'on prenne une toupie très-renflée vers son milieu, et qu'au moment de la mettre en mouvement, on la mouille sur toute la surface, on verra que l'eau aura disparu en totalité sur la partie renflée, tandis que, près du clou et près de la partie supérieure, il en restera une quantité notable : la projection de l'eau, par la toupie, peut même être aperçue.

Du Pendule.

23. La théorie du pendule dépend des connaissances que nous avons acquises précédemment sur la pesanteur et le mouvement curviligne.

Un pendule simple consiste en un point matériel suspendu par un fil sans pesanteur (*fig.* 10).

Ce cas idéal n'est pas réalisé dans la pratique; la verge du pendule, qui ordinairement est métallique, a un poids qu'on ne peut négliger; mais la mécanique fait connaître les procédés de calcul, par lesquels on ramène au pendule simple les résultats fournis par un pendule composé (1).

---

(1) Voici la formule : t étant la longueur du pendule simple correspon-

Quoi qu'il en soit, le mouvement du pendule simple, ou composé, est déterminé par l'action de la terre; si, par exemple, la masse pesante est portée en D, elle sera sollicitée par la pesanteur; mais cette force agissant dans la verticale $D\,d$, perdra une portion de son intensité. Pour apprécier la perte, il faut décomposer la force g en deux autres forces rectangulaires qui agissent selon $D\,h$ et $D\,F$. La première est détruite par la résistance de la verge $D\,C$; la seconde $m\,F$, perpendiculaire à $C\,D$, a pour valeur l'expression $g \cos d\,D\,F = g \sin h\,D\,d$. Cette composante tend à faire mouvoir la masse m dans le sens de la tangente $D\,F$; mais comme cette masse est retenue par le *point de suspension* C, la courbe décrite sera un arc de cercle; on voit de plus que l'action de la pesanteur ne contribue plus au mouvement de la masse m lorsqu'elle est parvenue au point le plus bas; de sorte qu'elle ne se mouvra qu'en vertu de la vitesse acquise dans sa chute par l'arc $D\,A$; il résulte du (n° 17), que cette vitesse est capable de lui faire parcourir un arc égal au premier. Elle montera donc jusqu'en B, où sa vitesse acquise est complètement détruite; alors, abandonnée à l'action de la pesanteur, elle retombera le long de $B\,A$; en A, la pesanteur sera détruite par la résistance du fil; le mouvement se continuera par la vitesse acquise, etc. Les oscillations auront ainsi lieu jusqu'à ce que la résistance de l'air,

---

dant à un pendule composé, on a $l = \frac{d^2 + m^2}{d}$: d = la distance du centre de gravité du pendule composé au centre de suspension. m représente le moment d'inertie de la masse de ce pendule rapporté à un axe parallèle à l'axe de suspension, et passant par le centre de gravité, divisé par la masse totale.

le frottement du point de suspension, les aient détruites.

Le mouvement de la chute du pendule est accéléré; mais l'accélération n'est pas uniforme, puisque la composante $g \sin DCA$ diminue à chaque instant, jusqu'au point le plus bas, où elle est nulle.

Le calcul démontre que la durée de petites oscillations est indépendante de leur amplitude, ce qui constitue l'isochronisme, qui n'est qu'approché dans le cercle.

24. Le pendule en usage dans les recherches de physique se rapproche beaucoup du pendule simple; il est formé d'une boule de platine très-lourde, suspendue à un fil de cuivre, assez gros seulement pour la soutenir; cette boule est enchâssée dans une calotte sphérique, fixée à l'extrémité du fil; on a soin de couvrir l'intérieur de cette calotte d'une matière grasse, afin de pouvoir chasser l'air qui se trouve entre la calotte et la sphère, et de rendre ainsi l'adhérence plus parfaite; la partie supérieure du fil est fixée sur un couteau en acier trempé, reposant sur un plan d'agate, de sorte que le frottement est sensiblement nul. Tel était à peu près le pendule imaginé par Borda (*fig.* 10 *ter*).

Un pendule semblable fait des oscillations de plus en plus petites, et finit par s'arrêter tout-à-fait. Cette destruction de la vitesse du pendule est particulièrement causée par la résistance de l'air qui allonge la durée de la demi-oscillation descendante, et abrège celle de la demi-oscillation ascendante (1) à peu près de la même quantité, d'où il suit que la durée d'une oscillation entière diffère peu de

(1) Bouguer a d'abord annoncé que la durée d'une oscillation entière est la même dans le vide que dans un milieu résistant: M. Poisson a soumis depuis cette question à l'analyse. (*Voy.* le Journ. de l'Éc. polyt., c. 15.)

ce qu'elle serait si le mouvement avait lieu dans le vide. Mais comme les excursions du pendule deviennent successivement plus faibles, et comme le temps dépend de la grandeur de l'arc parcouru, il en résulte que l'isochronisme est altéré; heureusement, cette altération est peu sensible, et le calcul peut en tenir compte.

Application du Pendule à la Pesanteur.

25. Nous avons déjà vu que les oscillations du pendule sont déterminées par l'action de la pesanteur. Elles doivent donc être plus ou moins rapides, selon que cette action est plus ou moins puissante. On conçoit même la possibilité de déduire cette intensité du nombre d'oscillations faites dans un temps déterminé par un pendule d'une longueur connue; en effet, l'analyse donne la relation $T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, T est le temps d'une oscillation infiniment petite; l, la longueur du pendule; g, l'intensité de la pesanteur, ou le double de l'espace parcouru par un corps pesant dans la première seconde de sa chute; π, le rapport de la circonférence au diamètre : et comme les deux élémens, la longueur et la durée, se mesurent avec une exactitude extrême, le pendule offre un moyen rigoureux de calculer l'intensité de la pesanteur : si l'on met dans cette formule la longueur du pendule qui bat les secondes à Paris, et qui est $0^m,99384$, la valeur de $\pi = 3,14154$ et $T = 1$, on trouve $g = 9,868$.

D'après la formule ci-dessus, on voit :

1°. Que les temps des oscillations sont comme les racines carrées des longueurs des pendules, et en raison inverse des racines carrées des intensités de la pesanteur;

2°. Que pour deux pendules différens en longueur, et soumis dans un même lieu à l'action de la pesanteur, les

durées des oscillations sont proportionnelles aux racines carrées des longueurs;

3°. Que si l'on transporte un même pendule dans différens lieux, les durées des oscillations sont en raison inverse des racines carrées des intensités de la pesanteur dans ces lieux.

4°. La même formule montre que les carrés des nombres d'oscillations faites par le même pendule, ou par deux pendules d'égale longueur, dans des lieux différens, pendant le même temps, sont proportionnels aux intensités de la pesanteur.

26. L'intensité de la pesanteur devient d'autant plus faible que la distance à la surface de la terre est plus grande. En effet, il résulte des observations de Bouguer, qu'en prenant pour unité la longueur du pendule à secondes à l'équateur et au niveau de la mer, cette longueur devait être réduite à 0^m, 9992 à Quito (à la hauteur de 2857 mètres); que sur le Pichincha à 4744 mètres de hauteur, elle était encore moindre (0,9988), et d'après le n° 25 les intensités de la pesanteur, sont dans les trois lieux comme les longueurs du pendule.

27. Le pendule offre encore le moyen de s'assurer de la variation de la pesanteur à différentes latitudes du globe.

Richer reconnut cette variation en 1672. Il vit qu'une horloge qui avait été réglée à Paris sur le temps moyen, retardait à Cayenne chaque jour d'une quantité constante, d'où il conclut que l'intensité de la pesanteur y était moindre. Bouguer s'assura aussi de la même variation à Saint-Domingue, à Quito, etc. Cette observation importante a été depuis confirmée par un grand nombre de voyageurs.

Il est bien constaté aujourd'hui qu'à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, on est obligé de donner plus de longueur au pendule, pour avoir des oscillations de même durée. Il en résulte que la pesanteur s'accroît de l'équateur aux pôles; car, puisqu'on allonge le pendule, les oscillations se ralentiraient si son intensité restait la même. Le tableau suivant donne une idée de la variation : (1)

	Latitudes.	Longueurs du Pendule.
		m
Equateur	0°	0,990925
	20°	0,991528
Paris	48° 50′ 14″	0,993846
	60°	0,994791
	80°	0,995924

C'est par des observations de ce genre qu'on a reconnu que la valeur absolue de la pesanteur augmente de $\frac{1}{173}$, de l'équateur aux pôles; ce nombre est supérieur à $\frac{1}{289}$ que nous avons obtenu par l'examen de l'influence de la force centrifuge sur l'intensité de la pesanteur. Ce fait, qui est le résultat de nombreuses observations, prouve donc, de la manière la plus évidente, que le diamètre de la terre à l'équateur est plus grand que celui des pôles (2). Ainsi, deux causes tendent à affaiblir l'action de la pesanteur à l'équateur : une plus grande force centrifuge et un plus grand éloignement du centre du globe (3).

---

(1) On trouve l'intensité de la pesanteur par la formule $T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. T est égal à 1, π et l sont connus en nombres; on en déduit g.

(2) Le diamètre du globe à l'équateur est égal à 12,753,968 mètres; celui des pôles est égal à 12.712,648.

(3) La forme de la terre déduite des résultats des expériences faites à l'aide du pendule, est la même que celle que donnent les mesures trigonométriques.

28. L'expérience montre encore que, quelle que soit la matière du pendule, pourvu que la longueur reste constante, le temps des oscillations est le même; nouvelle preuve que tous les corps sont également sollicités par la pesanteur ; vérité démontrée par des expériences directes, (n° 16). (*Voyez*, à la fin de l'ouvrage, la note sur le calcul de l'aplatissement de la terre par les expériences du pendule, et sur la mesure de la longueur du pendule à secondes.)

Application du Pendule aux Horloges.

29. Galilée observa le premier, vers 1602, que les petits arcs d'un pendule sont sensiblement parcourus dans le même temps : il conçut l'idée d'utiliser cette régularité pour les observations astronomiques et physiques; mais c'est particulièrement à Huyghens qu'on en doit l'emploi dans les horloges.

On sait qu'une horloge est formée par la réunion de plusieurs roues qui s'engrènent les unes dans les autres; les nombres de dents de ces roues sont dans les rapports qui existent entre les divisions adoptées pour la mesure du temps. Ces diverses roues sont tellement disposées que, lorsqu'une d'elles est mise en mouvement, toutes les autres marchent en même temps. On enroule autour de l'un des axes une corde à laquelle est suspendu un poids qui tend à faire tourner toutes les roues (*fig.* 11), et qui les ferait tourner précipitamment, si l'on ne régularisait sa marche par un pendule.

La roue à laquelle ce pendule est adapté est connue en horlogerie sous le nom de roue de rencontre. Cette roue est taillée différemment des autres, et de manière que son mouvement puisse être dirigé par deux palettes fixées

[illegible] 11 *bis* représente l'appa-
[illegible]ement : on voit par la fi-
[illegible] pendule est dans une position
[illegible] aux extrémités de l'échappe-
[illegible] entre les dents de la roue et
[illegible]. Mais si l'on écarte tant soit peu
[illegible]ule, la roue devenue libre obéit à
[illegible] l'entraîne, jusqu'à ce que le pendule
[illegible]sition de l'échappement. Dans un ap-
[illegible]ment disposé, cela arrive quand le pen-
[illegible] plus bas. Le pendule s'arrêterait aussi,
[illegible]quise ne lui faisait parcourir un arc égal à
[illegible] a été parcouru; il s'échappe donc de nou-
[illegible]ds fait tourner la roue, et ainsi de suite. Il est
[illegible]ns l'emploi du pendule, le mouvement du
[illegible]t accéléré, comme celui de tous les corps soumis
[illegible]n de la pesanteur; mais le pendule, par son échap-
[illegible], le remet continuellement dans l'état de repos :
de sorte qu'il n'a jamais que la vitesse que lui imprime la
pesanteur dans le petit intervalle d'une demi-oscillation.
De plus, cette disposition permet de concevoir comment le
pendule, malgré le frottement et la résistance de l'air,
continue son mouvement, l'action du poids lui rendant
à chaque oscillation, la vitesse qu'il a perdue. La lon-
gueur du pendule est tellement déterminée que le temps
d'une oscillation est une seconde. La régularité de cet
instrument ne serait pas parfaite, si l'on ne conservait
à la tige la même longueur, malgré les variations conti-
nuelles de la température à la surface de la terre. Nous
verrons, au chapitre des dilatations, les procédés ingénieux
imaginés par les artistes et les savans pour parvenir à ce
résultat.

De l'Équilibre produit par la composition de plusieurs forces appliquées à un même point matériel ou à plusieurs points matériels liés entre eux invariablement; du centre des forces parallèles; du centre de gravité.

30. L'action de plusieurs forces agissant simultanément sur un ou plusieurs points matériels présente deux cas qu'il est nécessaire de considérer. Il est possible que ces forces communiquent un mouvement au système, ou que s'entre-détruisant elles laissent le corps en repos. Ce repos, produit par la compensation de plusieurs forces, est désigné par le nom d'*équilibre*.

Deux forces égales appliquées dans des directions opposées à un même point matériel, offrent le cas le plus simple de l'équilibre; si les deux forces sont inégales, le point matériel se mouvra dans le sens de la plus énergique, comme s'il était sollicité par leur différence.

Le cas de l'opposition directe est le seul où l'équilibre soit possible entre deux forces égales. Si leurs directions font un certain angle, leurs efforts conspirent en partie, et le point matériel est sollicité par une force unique dont la direction et l'intensité sont déterminées par la règle du parallélogramme des forces. (*Voyez* le n° 18.)

La résultante de deux forces jouit d'une propriété que nous devons faire connaître à cause de son importance. Les lignes *C D* et *C E* (*fig.* 5 *bis*) abaissées d'un point quelconque de la résultante *A B*, perpendiculairement sur les directions des deux composantes *A D* et *A E*, ont leur longueur en raison inverse de l'intensité des forces vers lesquelles elles se dirigent. Par exemple, si les forces *p* et *q* sont représentées par les nombres 4 et 5, les perpendiculaires *C D* et *C E* le seront par les nombres 5 et

4. Cette propriété se démontre par la géométrie. Il résulte visiblement de ce rapport, que le produit de l'expression numérique de chaque force par la longueur de la perpendiculaire correspondante est un nombre constant; c'est-à-dire que $p \times DC$ est égal à $q \times CE$. On appelle *moment statique* d'une force par rapport à un point C, le produit de cette force par la longueur de la perpendiculaire abaissée de ce point sur sa direction.

Le cas d'un seul point matériel, est un cas abstrait qu'il était utile de considérer pour arriver aux cas plus composés que présentent les corps. Il n'existe aucun corps dont les diverses parties soient liées entre elles d'une manière invariable; mais la rigidité qui caractérise les corps dans l'état de solidité, exige que leurs parties se transmettent mutuellement l'impression des forces qui sollicitent quelques-unes d'entre elles. Quant aux liquides, l'impénétrabilité des parties en contact règle la répartition des forces qui leur sont appliquées.

Prenons quelques exemples. Soient deux forces p et q (*fig.* 12) situées dans un même plan et appliquées aux points a et a' d'un corps solide : pour avoir leur résultante il faut considérer que le point d'application d'une force peut être transporté en un point quelconque de sa direction, pourvu que le point soit lié au premier par une ligne inflexible : les deux forces étant, par supposition, dans le même plan, elles se rencontreront en un point c, il ne restera donc qu'à construire sur les directions ac et $a'c$, un parallélogramme, pour avoir l'intensité et la direction de la résultante.

Le cas de deux forces parallèles n'échapperait pas à la

solution précédente, parce que la règle de statique est indépendante de l'angle que font les directions des deux forces, en sorte qu'elle est encore vraie pour un angle nul. Ainsi nous avons dit plus haut que les longueurs des perpendiculaires *C D* et *C E* (*fig.* 5 *bis*), abaissées d'un point de la résultante *A B*, sur les directions des composantes, sont en raison inverse des forces composantes *p* et *q*. Ce même rapport sert pour la figure (13), où les deux forces sont parallèles. Pour avoir le point *c* d'application de la résultante, il faudra diviser *a a'* en deux parties réciproquement proportionnelles aux intensités des forces *p* et *q* : la résultante *r* sera égale à leur somme. Pour établir l'équilibre il n'y aura qu'à placer au point *c* une force *r'* égale, mais dirigée en sens opposé. Si les deux forces étaient dirigées en sens contraire, comme l'indique la figure (14), la résultante deviendrait égale à leur différence, elle agirait dans le sens de la plus énergique, et son point d'application serait hors des points d'application des composantes. Nous supposons ici les deux forces différentes en intensité et dans le même plan. Si elles étaient égales, ou si elles agissaient dans deux plans différens, il n'y aurait pas de résultante. Dans ces deux cas, il faudrait détruire chaque force séparément.

Maintenant que nous savons trouver la résultante de deux forces, dans les cas possibles, nous pouvons composer un nombre quelconque de forces. Si toutes les forces sont parallèles et dirigées dans le même sens, on composera d'abord deux forces, ensuite la résultante trouvée avec une autre, et ainsi de suite; la résultante définitive sera parallèle à la direction commune : si une partie des forces agit dans un sens, et une autre partie dans un autre sens, on

cherchera la résultante particulière à chaque groupe, on verra si ces résultantes sont égales ou inégales; dans le prémier cas, il n'y aura pas de résultante unique; dans le second, la résultante sera égale à leur différence. Son point d'application se trouvera par la règle indiquée plus haut. Le système sera maintenu en équilibre par l'application d'une force égale et dirigée en sens opposé.

31. Pour faire saisir ce qu'on entend par *centre de gravité*, disons un mot du *centre des forces* parallèles : pour cela, supposons qu'on ait déterminé le point *A* d'application de la résultante d'un certain nombre de forces parallèles (*fig.* 15); si toutes les forces sans changer d'intensité, et sans cesser d'être parallèles, prennent simultanément une autre direction, leur résultante conservera la même grandeur; seulement sa direction dans l'espace sera changée : elle traversera le corps suivant une autre droite. On démontre en statique que toutes les résultantes ainsi déterminées concourent en un seul point *A*, que l'on appelle *centre* des forces parallèles. Il est clair que si l'on fixe ce point, l'équilibre sera établi, quelle que soit la direction des forces.

Appliquons ces résultats aux corps pesans : la pesanteur agit perpendiculairement à la surface de la terre. Ainsi un corps est sollicité par un nombre infini de forces parallèles et perpendiculaires au lieu de l'observation. Les efforts partiels de la pesanteur de toutes les particules composent une somme dont la résultante est le *poids* de ce corps. Cette résultante devra, quelle que soit la position du corps, d'après ce qui précède, passer par un point unique : ce point est le *centre de gravité* du corps.

Si ce point est fixe, on pourra faire tourner le corps au-

tour de lui sans que l'équilibre soit détruit. L'équilibre sera encore établi, quand le point fixe se trouvera dans la droite verticale passant par le centre de gravité du corps.

On conçoit de même qu'un fil (*fig.* 10 *bis*) à l'extrémité duquel est fixé un corps pesant, se tiendra vertical dans le cas de l'équilibre, et que son prolongement passera par le centre de gravité du corps. Ce petit appareil porte le nom de *fil à plomb;* il sert, comme chacun sait, à une infinité d'usages, à s'assurer de la verticalité d'un mur, à déterminer le centre de gravité d'un corps, etc. Pour cette dernière détermination, on suspend successivement le corps par deux points différens : il est visible que la prolongation du fil de suspension à travers le corps, dans chaque expérience, fait connaître ce point, car l'équilibre ne peut être établi sans que le fil passe par le centre de gravité : il est donc le point de concours des deux directions du fil.

La position du centre de gravité dans les corps *homogènes* ne dépend que de leur forme. Si les corps sont *hétérogènes*, c'est-à-dire des corps dont toutes les parties ne sont pas semblables, la détermination de leur centre de gravité exige qu'on connaisse la distribution de la matière. Par exemple, le centre de gravité d'un aréomètre se trouve dans la partie inférieure, parce que cet instrument en général est essentiellement formé d'un tube, dont la partie inférieure est remplie de mercure ou de plomb, matières bien plus denses que le verre. La doctrine des centres de gravité est du ressort de la statique; nous n'en parlons ici que parce que la notion nous en sera utile dans la suite. Nous citerons pour le moment quelques conséquences simples : ainsi un corps solide posé sur un

plan horizontal est en équilibre, si la verticale qui passe par son centre de gravité rencontre le plan par un des points sur lesquels le corps pose, ou dans l'espace que ces points embrassent. Un homme ne se soutient bien qu'autant que la verticale passant par son centre de gravité tombe dans l'espace quadrangulaire compris entre les contours extérieurs de ses deux pieds. Tous les mouvemens que fait l'homme près de tomber tendent toujours à le remettre dans cette position. L'art du danseur de corde, la manière d'assurer la stabilité des hautes voitures, etc., se rapportent encore à la théorie des centres de gravité; mais cette théorie ne peut être développée qu'à l'aide du calcul.

De quelques Machines simples.

32. Nous avons déjà donné la définition du repos, du mouvement absolu et relatif; nous avons dit ce qu'on entend par résultante de plusieurs forces : nous entrerons donc tout de suite dans les détails relatifs aux machines.

On appelle en général machine un instrument propre à transmettre l'action d'une ou de plusieurs forces.

La force dont on dispose est la *puissance;* la force qu'on veut vaincre ou à laquelle on veut seulement faire équilibre, est la *résistance.*

La puissance et la résistance ne sont pas opposées directement l'une à l'autre; car alors il n'y aurait d'équilibre possible que dans le cas de l'égalité des deux forces.

On décompose l'effort de la puissance à vaincre, de manière qu'une partie de son énergie soit supportée par un ou plusieurs points fixes. Au moyen de cette disposition, des forces très-inégales peuvent se faire équilibre, comme on le verra plus loin.

Il existe plusieurs machines qui sont les élémens des autres machines, et sur lesquelles nous allons donner quelques notions élémentaires qui suffiront au but que nous nous proposons. Ces machines sont : le levier, le plan incliné, la poulie, la vis, le coin et le treuil.

Du Levier.

33. Une barre *m c n* (*fig.* 16) inflexible, droite et retenue par un point fixe *c*, forme ce qu'on appelle un levier. Le point fixe *c* est le point d'appui. On conçoit bien que les forces inégales *p* et *r*, appliquées aux extrémités *m* et *n*, peuvent se faire équilibre.

Si le levier est droit (*fig.* 16), et si les deux forces *p* et *r* sont parallèles, les distances *m c* et *c n*, comprises entre le point d'appui et le point d'application de chaque force, se nomment les bras de levier de ces forces.

Dans notre figure, *p* représente la puissance; *r* la résistance. Il faut et il suffit, pour que l'équilibre soit établi, que la résultante des deux forces passe par le point d'appui *c*, et l'on démontre que pour que cette condition soit remplie on doit avoir la proportion :

$$p : r :: c\,n : c\,m.$$

C'est-à-dire que *dans le cas* d'équilibre du levier, *la puissance et la résistance sont en raison inverse de leurs bras de levier*, d'où il résulte que, par le moyen du levier, une faible force peut équilibrer et même vaincre une force considérable.

La charge supportée par le point d'appui est exprimée par la résultante des forces *p* et *q*. Dans le cas de la figure 16, elle est égale à leur somme. Si les deux forces étaient dirigées en sens contraire, la résultante serait leur différence (*fig.* 17).

[illegible] : le levier du premier
[illegible] d'appui se trouve entre
[illegible] le levier du second genre
[illegible] point d'appui et la puis-
[illegible] sième genre est celui dont la
[illegible] point d'appui et la résistance.
[illegible] du levier du premier genre dans
[illegible] balance ordinaire doit avoir ses
[illegible] pour que des poids qui se font
[illegible] Cette condition n'est pas nécessaire
[illegible] destinées aux recherches, et fort heu-
[illegible] n'est jamais possible de l'obtenir avec
[illegible] de.

[illegible] les doubles pesées est tout-à-fait indépen-
[illegible] des bras de la balance. Elle consiste à
[illegible] dont on désire connaître le poids dans un
[illegible] balance, et à établir l'équilibre par de la gre-
[illegible] ou de tout autre manière. Quand cet
[illegible] obtenu, on remplace le corps par des poids,
[illegible] de nouveau l'équilibre; ces poids donnent
[illegible], puisqu'ils font, ainsi que lui, dans les mê-
[illegible] stances, équilibre à une même quantité de ma-
[illegible] Nous apprendrons plus tard par l'expérience com-
[illegible] ment compte de toutes les causes qui font que le
[illegible] corps, pesé dans des temps différens, dans la même
[illegible] peut bien ne pas donner toujours le même poids.
[illegible] 18 représente un modèle de balance de M. For-
[illegible]

[illegible], ou le fléau *A B*, est en acier trempé; on lui
[illegible] assez de solidité, pour qu'il n'éprouve pas de flexion
[illegible] par les poids qu'on lui fait supporter. On cher-

che à donner aux parties $A\,C$ et $B\,C$, situées de part et d'autre du point G, centre de gravité du fléau, la plus grande similitude. Le point de suspension C est un peu au-dessus du centre de gravité; de sorte que le fléau tend toujours à revenir dans la position la plus stable. Pour que la mobilité du fléau soit très-grande, on donne à la pièce de suspension C la forme d'un tranchant, qu'on fait en acier très-dur et fortement trempé; le tranchant repose d'ailleurs sur un plan d'acier bien poli. Pour rendre appréciables les moindres mouvemens du fléau, on y a fixé une aiguille $C\,K$, perpendiculaire à $A\,B$; dans le cas d'équilibre, l'extrémité de cette aiguille répond au zéro d'un arc de cercle tracé en K.

Pour que les pesées soient exactes, il y a deux conditions à remplir : la première, c'est de rendre la balance très-sensible, et on y parvient en faisant le tranchant du couteau de suspension très-vif, et en donnant un grand poli au plan d'acier sur lequel il repose; de plus comme il faut que le couteau et le plan d'acier ne s'altèrent point par une pression continuelle, on dispose sous les bras du levier deux fourchettes F et F', qui, dans les intervalles des expériences, les soutiennent de manière à empêcher toute espèce de frottement. Les fourchettes sont soulevées ou abaissées à l'aide d'une manivelle.

La deuxième condition est que les points de suspension S et S', soient bien rigoureusement les mêmes dans deux opérations consécutives. Car nous avons vu (n° 33) que la force nécessaire pour faire équilibre à une résistance donnée est d'autant plus faible, que le bras du levier, auquel on l'applique, est plus grand. Comme aucun indice, dans l'opération de la pesée, n'avertirait l'observateur du déplacement d'un des points de suspension, il serait expo-

sé à commettre de grandes erreurs. C'est pour obvier à ce grave inconvénient que l'artiste a disposé les choses de manière que la suspension se fasse par des couteaux croisés, en acier très-dur (*fig.* 18 bis).

Du plan incliné.

35. Il a déjà été question du plan incliné, à l'article des lois de la pesanteur (*fig.* 2 et 3).

On ne peut soutenir un corps pesant, s'il est libre, qu'avec une force égale à son poids. Une force moindre le soutiendra sur le plan incliné. Soit un corps *H K*, placé sur le plan incliné *C B* (*fig.* 19) : qu'on mène par son centre de gravité *G*, la verticale *G R*. Cette ligne représentera l'effort de la pesanteur appliquée à ce point; qu'on décompose, d'après la règle du parallélogramme des forces, cette résultante en deux autres forces, l'une *GD* parallèle, et l'autre *G F* perpendiculaire au plan. La dernière sera détruite par la résistance du plan; la première agira seule pour faire glisser le corps et *sera à la résultante dans le rapport de G D à G R*; ou, vu la similitude des deux triangles *G D R* et *A C B*, *comme la hauteur A C à la longueur C B du plan incliné.*

Tel est le rapport qui doit exister entre la puissance appliquée dans la direction *DG* et le poids du corps, pour que ce corps ne puisse pas glisser le long du plan.

On voit donc qu'avec un plan incliné il est possible de faire mouvoir un poids considérable par le moyen d'une force qui l'est beaucoup moins. Aussi le plan incliné est-il souvent employé dans les arts.

De la Vis.

36. La théorie de la vis (*fig* 20) est liée à celle du plan

incliné. La vis est un cylindre *A B*, revêtu d'un filet saillant, adhérent à sa surface.

La pièce *E E* est connue sous le nom d'écrou. La vis entre dans l'écrou; on pratique dans l'intérieur de l'écrou une rainure tout à fait semblable au filet *H K L* de la vis. Il faut, lorsque la vis est introduite dans l'écrou, que la rainure soit exactement remplie par le filet; par cette disposition, la vis ne peut s'avancer dans le sens de sa longueur, qu'en tournant sur elle-même. Tantôt la vis est fixe et l'écrou est mobile; c'est ce cas qui est représenté par la figure 20 : tantôt la vis est mobile et l'écrou dans une position fixe (*fig.* 20 *bis*). La puissance agit à l'extrémité du levier *E F*. Elle a d'autant plus d'avantage, que ce bras de levier, auquel elle est appliquée, a plus de longueur, et que le pas de la vis est plus fin; et l'on démontre par le calcul, que la puissance est à la résistance, comme le pas de la vis est à la circonférence du cercle que la puissance tend à faire décrire à son point d'application.

De la Poulie.

37. Une poulie est une roue circulaire, creusée en gorge à sa circonférence, et traversée à son centre par un axe autour duquel elle peut tourner (*fig.* 21). Si l'axe est retenu fixement, *la poulie est fixe*; la poulie est *mobile*, quand l'axe est libre; alors elle peut se mouvoir dans l'espace en même temps qu'elle tourne autour de son axe.

Considérons la poulie fixe. Supposons qu'une corde flexible, *A B C D*, soit passée dans la gorge de la poulie et embrasse une portion de sa circonférence; appliquons à l'extrémité *A* la puissance, et la résistance à l'extrémité *D*. Les forces agiront suivant les tangentes, et il est visi-

ble que l'équilibre ne pourra être établi que dans le cas de l'égalité de la puissance et de la résistance. La résultante des deux forces passe par le centre de la poulie, et est détruite par la résistance de l'axe. De plus, si les forces sont parallèles, cet axe supporte un effort égal à leur somme. La poulie fixe offre le moyen de changer la direction d'une force sans en altérer l'intensité.

Dans la *poulie mobile* (*fig.* 22), la corde est attachée par une extrémité à un obstacle invincible F; à l'autre extrémité est appliquée la puissance P; enfin, le poids à soulever est suspendu à l'extrémité H de la chape. Le point F supporte une pression égale à la force P, appliquée à l'autre extrémité. L'équilibre sera donc établi si la résistance est égale à la résultante de deux forces égales à P. Si les deux forces sont parallèles, $R = 2\,P$; c'est le cas le plus favorable à la puissance.

38. On appelle *moufle* un assemblage de plusieurs poulies fixes ou mobiles. La figure 23 représente la combinaison la plus avantageuse à la puissance. Toutes les poulies, à l'exception de la poulie A, à laquelle est appliquée la puissance, sont libres. Souvent on donne une disposition différente (*fig.* 24). En général, la forme des moufles dépend de l'usage auquel on les destine.

Le calcul montre que, pour l'équilibre, la puissance doit être égale à la résistance divisée par 2^n, dans la première disposition (*fig.* 23), n étant le nombre des poulies mobiles, en sorte qu'avec une force P, on fait équilibre à une résistance $2^3\,P$ ou $8\,P$. Dans la figure 24, les trois poulies supérieures sont fixes, les trois inférieures sont mobiles, on a $P = \frac{R}{2 \times n}$ ou $\frac{R}{6}$, puisque $n = 3$.

Du Treuil.

39. On appelle treuil, tour ou cabestan, une machine qui consiste en un cylindre d'un diamètre quelconque, auquel est attachée une roue d'un plus grand diamètre. Le centre de cette dernière roue est dans l'axe du cylindre, et son plan lui est perpendiculaire. Les figures 25, 26, 27, représentent cette machine sous les formes les plus usitées. Le cylindre *A B* est terminé par deux cylindres plus petits, nommés *tourillons*; ces tourillons sont enchâssés dans des appuis fixes, de manière que le cylindre n'a de mouvement libre qu'autour de son axe. Une corde s'enroule sur le cylindre; elle y est fixement attachée par une de ses extrémités; le corps *R* à mouvoir est à son autre extrémité. La puissance agit en un point quelconque de la grande roue, tangentiellement à sa surface (*fig.* 25). Quelquefois la puissance est appliquée à une manivelle (*fig.* 26); mais si la direction de la manivelle est perpendiculaire au rayon du cylindre *AB*, le même rapport existe toujours entre la puissance et la résistance. On démontre en statique que pour que l'équilibre soit établi dans le treuil, il faut que la puissance soit à la résistance comme le rayon du cylindre *c m* est au rayon de la roue *E D*, ou à la longueur de la manivelle *F H*; c'est-à-dire qu'on a la proportion

$$P : R :: cm : ED \text{ ou } FH.$$

Comme dans la pratique la corde a toujours un diamètre notable, il faut considérer la puissance comme agissant suivant l'axe de la corde, et augmenter le rayon du cylindre de celui de la corde. Cette circonstance diminue un peu l'avantage de la puissance.

Des Propriétés générales des Fluides.

40. En général, on distingue les fluides en liquides et en fluides élastiques. Les premiers subissent de faibles changemens dans leur volume, pour des variations considérables dans les pressions auxquelles ils sont soumis. Les seconds au contraire, dans des limites très-étendues, occupent des volumes qui sont sensiblement en raison inverse des forces qui les compriment. C'est cette différence qui a fait donner aux premiers le nom de fluides incompressibles.

Le caractère principal d'un fluide se trouve dans la grande mobilité de ses particules. Ce caractère est offert par l'eau, l'alcool, l'air atmosphérique, etc.

De l'Équilibre des Liquides incompressibles.

41. *Principe de l'égalité de pression.* — Ce principe, sur lequel repose l'hydrostatique, est une suite de la parfaite mobilité des particules des liquides; on le conçoit bien *à priori*; on le démontre aussi par l'expérience directe. Par exemple, qu'on prenne un vase cubique ou de tout autre forme (*fig.* 28), et qu'on dispose un piston sur chacune de ses faces, on verra que si l'on applique à un des pistons une force quelconque, il faudra appliquer aux autres des forces égales pour faire équilibre au premier, s'ils ont la même base, et des forces proportionnelles aux bases, si ces dernières sont différentes.

Nous faisons ici abstraction de la pesanteur du liquide; car, pour un liquide pesant, la pression est variable, et elle est d'autant plus grande, que le point de la paroi, soumis à la compression, est plus bas, de sorte que ce que nous venons de dire relativement à l'égalité de la pression

dans tous les sens, ne doit s'entendre que des pressions exercées sur le liquide par une force quelconque. Pour voir l'influence du poids du liquide, on n'a qu'à pratiquer aux parois d'un vase des ouvertures à diverses hauteurs; le liquide s'écoulera avec des vitesses très-différentes; la vitesse sera d'autant plus grande, que l'ouverture sera plus rapprochée de la base; si l'ouverture supérieure du vase est libre, la pression atmosphérique se transmettra par l'intermédiaire du liquide, et produira un effet égal sur tous les points des parois; mais la pression causée par la pesanteur du liquide sera variable.

42. Si l'on remplit un siphon partout d'un même diamètre (*fig.* 29), en partie d'un même liquide, il est clair que la symétrie seule veut, pour qu'il y ait équilibre, que le liquide se tienne au même niveau dans les deux branches. La même égalité existera encore, quelle que soit la différence des diamètres (*fig.* 30), ce qui montre que la pression d'un liquide ne dépend que de sa hauteur; de sorte qu'elle est égale sur les bases des vases (*fig.* 31).

La configuration des parois n'entre pour rien dans l'évaluation de la pression. Dans tous les cas où la hauteur et la nature du liquide, l'étendue de la base, seront les mêmes, la pression supportée par la base sera la même aussi. C'est là ce qu'on connaît sous le nom de *Paradoxe hydrostatique*. On a fait quelquefois une expérience fort curieuse, et dont l'explication est fondée sur ce qui vient d'être dit. Cette expérience consiste à faire crever un tonneau (*fig.* 32), à l'aide d'un tube d'un diamètre de quelques lignes, qu'on remplit ainsi que le tonneau; la pression ne dépendant que de la hauteur, celle qu'exercera le liquide du tube sera absolument égale à la pression

qu'exercerait un autre cylindre du diamètre du tonneau. C'est encore sur la même propriété qu'est fondée la presse hydraulique dont on a fait tant d'applications dans ces derniers temps. (*Voyez* la pompe foulante.)

Si chaque branche du siphon renfermait un liquide particulier, et que le mélange ne fût point opéré, les hauteurs seraient en raison inverse des densités. Il existe dans les anciens cabinets de physique des aréomètres à siphon, fondés sur cette propriété. Ces instrumens ne conduisent qu'à des résultats peu approchés de la vérité.

43. Il résulte de la nature des fluides que si l'on décompose la pression exercée sur chaque point d'une paroi en deux forces, l'une horizontale, l'autre verticale, les forces horizontales d'un même niveau se détruisent, et c'est ce qui fait que le vase reste en repos; de sorte que si l'on perçait une des parois, la pression devenant nulle en ce point, le vase serait poussé en sens contraire par l'effet de la pression opposée. On peut réaliser ce résultat d'une manière fort simple. Qu'on adapte à un tube de deux pouces de diamètre environ un fond en cuivre, auquel sont fixés deux tubes recourbés à angle droit (*fig.* 33); que tout l'appareil soit rempli d'eau; si on le suspend à un fil de lin ou de soie, ou si on le pose sur un pivot, il prendra une position fixe; si ensuite on ouvre les deux robinets R et R', le liquide s'écoulera et l'appareil prendra un mouvement de rotation en sens opposé. On pourrait encore fixer un vase cylindrique sur une lame de liége flottante sur l'eau : on verrait le vase se mouvoir en sens opposé de la section qu'on aurait pratiquée à la paroi verticale.

44. *Principe d'Archimède.* — Ce principe consiste en ce qu'un corps plongé dans un fluide, perd de son poids,

une quantité égale au poids du volume de fluide déplacé.

Pour concevoir ce principe, supposons une masse de fluide en équilibre; supposons de plus qu'on isole par la pensée une masse *m* de la masse totale : les pressions horizontales éprouvées par la masse *m* se détruisent, et la résultante des pressions verticales est égale et directement opposée au poids de cette même masse.

La solidification de cette masse, sans changement dans la densité, ne troublerait pas l'équilibre; et si on la remplaçait par un corps d'une densité plus grande, l'équilibre ne pourrait plus exister; le corps tomberait, mais son poids serait diminué du poids d'un pareil volume de fluide.

Pour vérifier ce résultat, on fixe au plateau d'une balance un cylindre plein, et l'on place dans le plateau un cylindre creux, dont la capacité intérieure est parfaitement égale au volume du cylindre plein; on établit l'équilibre; ensuite on plonge le cylindre plein dans l'eau; l'équilibre de la balance est troublé, on le rétablit en remplissant d'eau le cylindre placé sur ce plateau : le volume de cette eau est le même que le volume du corps plongé : son poids équivaut donc à la perte de ce dernier (*fig.* 34).

Si le corps est plus léger que le fluide, il monte jusqu'à ce que le poids du fluide déplacé soit égal au sien.

45. Une masse de liquide libre, sollicitée par une force de pesanteur dirigée vers son centre, ne serait en équilibre qu'autant que les résultantes seraient normales à sa surface : cette masse prendrait la forme sphérique. Ce serait le cas de la mer, si la terre était en repos; la rotation de la terre ne fait qu'accumuler à l'équateur une plus grande quantité de matière; la courbure est toujours sensible-

ment sphérique. Aussi, dans les temps les plus favorables, n'aperçoit-on pas les vaisseaux à plus de six lieues. Mais, vu la grandeur du rayon du globe, les forces normales des points peu éloignés, sont sensiblement parallèles; c'est pour cela que dans nos pièces d'eau, la surface diffère peu d'une surface plane.

On a mis cette propriété à profit pour la construction d'un instrument connu sous le nom de niveau d'eau, qui sert à déterminer le plan tangent à la surface de la terre. Il est formé (*fig.* 35) d'un tube horizontal terminé par deux branches verticales *A* et *B*. Le tube horizontal et les deux branches verticales sont ordinairement remplis d'eau, presque en totalité. De là, la dénomination de niveau d'eau.

46. On a aussi construit un niveau à bulle d'air (*fig* 36). Dans un tube légèrement convexe, on introduit un liquide ordinairement coloré; on y laisse une bulle d'air qui, d'après sa légèreté, doit toujours se trouver à la partie la plus élevée du tube. L'instrument est bon si, lorsqu'il est sur un plan horizontal, le milieu de la bulle d'air répond toujours au zéro de la division tracée sur le tube même, quel que soit le sens dans lequel on le tourne.

L'histoire des densités et des aréomètres est naturellement liée au principe d'Archimède; mais comme les expériences doivent être rapportées à une même température, pour qu'on obtienne des résultats exacts, nous ne nous occuperons de ce sujet qu'après l'exposition des phénomènes de la chaleur. Pour la même raison nous remettrons l'étude de la pression atmosphérique.

Compressibilité des Liquides.

47. Dès 1650, les membres de l'académie de Florence

cherchaient à reconnaître la compressibilité de l'eau : ayant scellé une sphère d'or remplie d'eau et l'ayant soumise à une forte compression, ils virent le liquide se faire un passage à travers les pores du métal, d'où ils crurent devoir tirer la conséquence de la non-compressibilité de l'eau; conséquence qui, comme nous allons le voir, est tout-à-fait contraire à la réalité.

Tous les physiciens ne donnaient pas leur approbation aux idées des académiciens de Florence ; un grand nombre, se fondant sur la propriété qu'a l'eau de transmettre le son, admettaient par cela même son élasticité et sa compressibilité.

Des essais nombreux furent faits dans divers pays; mais les procédés n'étaient pas dirigés de manière à rendre le résultat indépendant de l'extension du vase : il s'ensuit que, quoique la diminution apparente du volume du liquide fût considérable, il n'était pas permis de l'attribuer, complétement du moins, à la compression.

Dans le mode d'expérience de Kanton, le vase conservait son volume; la figure 37 le représente. Ce vase consiste en un tube de thermomètre ordinaire dans lequel est introduit le liquide : la colonne liquide est terminée par une petite colonne de mercure servant d'index. Kanton place ensuite le thermomètre ouvert sous la machine pneumatique et y fait le vide; il observe la hauteur du liquide; il laisse rentrer subitement l'air, et, au moment même de la rentrée de ce fluide, le liquide (l'eau, le mercure ou l'huile) baisse au-dessous de son niveau primitif, d'une quantité fort sensible. Le vase, étant comprimé autant au-dehors qu'au-dedans, ne peut modifier la compression du liquide. Kanton obtint ainsi

0,000046 du volume primitif pour la compression d'une atmosphère. M. Œrstedt, en plaçant ce même appareil dans une éprouvette à pieds remplie d'eau, et y faisant descendre un piston par le moyen d'une vis, a trouvé 0,000045. M. Perkins, en Angleterre, vient aussi de faire sur le même sujet des expériences très-ingénieuses, à plusieurs centaines d'atmosphères, et le résultat de ses expériences est que l'eau est compressible au degré à peu près qu'avait assigné Kanton. La compressibilité des liquides est donc un fait aujourd'hui bien constaté. Le mercure est beaucoup moins compressible que l'eau; l'alcool, l'éther sulfurique et les liquides analogues le sont davantage.

L'appareil de M. Œrstedt ne nous paraît pas exact, puisqu'il n'avertit pas si le petit index pénètre ou ne pénètre pas dans le liquide pendant l'expérience. Un autre appareil, représenté dans la figure 38, pourrait lui être substitué. Quand le tube serait plongé dans la machine à compression, l'air de la partie *C D* séparerait toujours le petit index *m* du liquide environnant, en sorte que la pénétration de cet index dans le liquide du tube *m n* n'occasionerait aucune erreur, puisqu'on connaîtrait toujours le volume sur lequel on opérerait. L'éprouvette à eau serait remplacée par une éprouvette à mercure.

(*Voyez* les additions pour les tubes capillaires.)

Mouvement des incompressibles.

48. Torricelli a découvert que, pour un liquide dont les molécules sont douées d'une mobilité parfaite, s'écoulant par un petit orifice et dont le mouvement n'est déterminé que par son propre poids, la vitesse à l'orifice est celle qu'acquerrait un corps pesant, tombé en chute libre, depuis la surface supérieure jusqu'au niveau de l'orifice.

Ce résultat n'est pas changé, lorsque la surface supérieure et la surface de l'orifice sont également pressées; ainsi il est encore vrai, à l'air libre.

Si, par exemple, la hauteur de la colonne est 15 mètres, la vitesse, au commencement de l'écoulement, sera (n° 16) $\sqrt{2g.h.} = \sqrt{2 \times 9^m,8 \times 15}$ (1).

49. Chaque point du fluide et des parois du vase qui le renferme, éprouve une pression presque égale au poids de la colonne fluide située au-dessus de son niveau, augmentée des forces étrangères appliquées à la surface supérieure. Cette pression est la même que dans l'état de repos; c'est d'elle que les molécules effluentes reçoivent leur vitesse. On peut voir par l'expérience qu'elles n'acquièrent la vitesse *maximum* (*fig.* 39) qu'après un temps appréciable.

La figure tracée par le jet serait une parabole dans le vide; cette forme est un peu altérée par la résistance de l'air.

50. Pour connaître la quantité de fluide écoulé, il faudra multiplier la vitesse par la surface de l'orifice; le produit sera le nombre cherché pour l'unité de temps. Quand on fait l'expérience, qui est facile, on trouve un résultat égal aux $\frac{2}{3}$ du résultat calculé; cette différence tient au rétrécissement produit à la sortie du jet, et qu'on appelle *contraction de la veine fluide*. La veine conserve

(1) Les *clepsydres*, ou *horloges d'eau* des anciens, étaient fondées sur la loi de l'écoulement des liquides. On conçoit en effet, d'après le n° 48, la possibilité de partager un vase plein de liquide en parties telles, qu'elles soient vidées dans des temps égaux. Les clepsydres ont reçu différentes formes; il ne s'agit ici que du principe de leur construction.

quelque temps le même diamètre, et ensuite s'élargit en gerbe, en se mêlant avec l'air.

Ce qui détermine la contraction, c'est la différence des vitesses: les molécules qui partent des bords de l'orifice ont d'abord une vitesse plus petite que celles du centre; leur vitesse s'accroît à mesure qu'elles s'approchent de la *section contractée* (section de la veine contractée.) A ce point, depuis le centre jusqu'à la surface, toutes les molécules ont une vitesse sensiblement égale, qui est très-peu différente de la vitesse calculée. (*Voyez* l'ouvrage de Belidor, avec les notes de M. Navier; le Mémoire de M. Hachette, Ann. ch. phys., 1817-1818, etc.)

Il paraît que la section contractée est l'orifice qu'on doit considérer; car, si l'on adapte un ajutage semblable et égal à la portion de la veine fluide comprise entre l'orifice et la section contractée, le produit de l'écoulement est le même. Cet accord a suggéré un moyen indirect, mais très-exact, pour mesurer la section contractée : on compare le produit de l'écoulement sous une pression constante et par un orifice connu, au produit que fournirait la loi de Torricelli. Le rapport de ces deux produits donne celui de la section contractée à la surface de l'orifice; et, comme cette dernière est connue, la première le sera aussi.

Pour que des expériences de ce genre soient exactes, la constance du niveau est de rigueur. On remplit aisément cette condition, en faisant arriver dans le vase un courant continuel de liquide, dont l'excès s'écoule par une ouverture latérale pratiquée à la hauteur fixée. On peut aussi employer un moyen ingénieux imaginé par M. Prony. Ce moyen consiste à faire plonger un flotteur dans la cuve dans laquelle on veut entretenir un niveau constant; on

fixe de plus, par le moyen de tringles, à ce flotteur, le vase qui reçoit le liquide écoulé; de sorte qu'il plonge d'autant plus, qu'il s'est écoulé plus de liquide, et même, vu la minceur des parois, il remplace, par son immersion, sensiblement le volume disparu (*fig.* 40).

On peut ajouter que la portion de la veine qui n'est pas encore désunie par le mélange de l'air, paraît dans un repos parfait; que le jet, quelle que soit la forme de l'orifice, trace sensiblement une parabole; que les autres élémens de la veine contractée sont modifiés par la forme de l'orifice : la hauteur du liquide et la forme des ajutages influent singulièrement sur le produit de l'écoulement; par exemple, la quantité de liquide écoulé sera moindre, si la paroi est convexe vers le liquide (*fig.* 41); elle sera plus grande, dans le cas contraire (*fig.* 42).

On appelle *pouce d'eau* la quantité de ce liquide écoulé par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, sous une pression de sept lignes au-dessus de son centre. La quantité d'eau qui coule pendant une minute par l'orifice d'un pouce de diamètre, est 28 livres, ou 13^{lit},706. Ce qui équivaut à un cylindre d'un pouce de diamètre, et de 880 pouces de longueur.

Si l'on désire l'évaluation du produit d'un ruisseau en pouces d'eau, il suffira de recevoir l'eau qu'il fournit par minute, et de diviser le produit par 28 livres : le quotient exprimera le nombre de pouces d'eau.

Il est souvent impossible d'avoir directement l'eau écoulée; on y supplée par l'observation de la vitesse. On jette sur la surface de l'eau une boule d'une densité telle qu'elle s'enfonce presque complètement, de cire par exemple, à laquelle on ajoute un corps plus dense; on observe

la vitesse par minute, avec une bonne montre à secondes; et, en divisant ce nombre par 880, on a le nombre de pouces d'eau que fournirait par minute une section circulaire d'un pouce.

Il faut remarquer que cette évaluation sera relative à la surface; car il a été reconnu que la vitesse d'une eau profonde n'est pas la même à sa surface et dans son intérieur.

Tout ce qui a été dit précédemment sur le pouce se rapporte à une pression de sept lignes : si la hauteur était différente, on aurait recours à la règle de Torricelli; on sait, d'après cette règle, que le produit est proportionnel à la racine carrée de la hauteur : 28 de pression donneraient un produit double; 63 en donneraient un triple, etc.

51. Nous dirons un mot des jets d'eau : soit un vase *ABCD* (*fig.* 43) rempli d'eau jusqu'à la hauteur *AB*; le liquide qui s'écoule en *E* a la même vitesse que celle qu'acquerrait un corps tombé de cette hauteur : il doit donc s'élever à une hauteur *E F* égale à *A B*; telle serait en effet la hauteur observée dans le vide. Mais elle est beaucoup moindre dans l'air, à cause de la résistance de ce fluide. Voici la formule déduite des expériences de Mariotte : H et H' étant les hauteurs de deux réservoirs, et h et h' étant celles qu'on veut donner aux jets d'eau, on a la proportion $H - h : H' - h' :: h^2 : h'^2$.

Une hauteur de 5 pieds 1 pouce produit un jet de 5 pieds; Veut-on connaître la hauteur du réservoir capable de fournir un jet de 100 pieds? 5 est contenu 20 fois dans 100; la différence entre la hauteur cherchée et celle du jet d'eau sera proportionnelle au carré de 20 ou à 400 pouces, ce qui fait 33 pieds 4 pouces. La hauteur du réservoir devra donc être de 133 pieds 4 pouces. Pour que cette règle soit

d'accord avec l'expérience, il faut donner au jet une légère obliquité, afin que le liquide qui retombe vers la terre, n'affaiblisse pas la vitesse du jet ascendant.

52. Mongolfier, l'inventeur des aérostats, a tiré parti de la vitesse qu'acquiert un liquide en mouvement pour la construction d'une machine fort simple et fort ingénieuse, qu'il a nommée *belier hydraulique*. Le belier hydraulique est représenté dans la figure 1, pl. 15.

Cette machine se compose d'un tuyau horizontal *A B* qui reçoit l'eau d'un réservoir *A C*, et qui se termine par un évasement circulaire *ccc;* les ouvertures *ccc* sont fermées de bas en haut par des boules; ces boules sont retenues immédiatement au-dessous des ouvertures, par des brides. *M N* est une cloche en fonte, dans le fond de laquelle sont des cavités qui communiquent avec le tuyau vertical *E F* destiné à conduire l'eau à la hauteur voulue; *kk* sont des ouvertures fermées par des boules semblables aux boules *ccc;* elles sont aussi retenues par des brides. Enfin *G* est un petit réservoir d'air communiquant avec le tuyau horizontal *A B;* cette partie de la machine est un perfectionnement de M. Mongolfier fils. Toute la machine est maintenue solidement à l'aide d'une maçonnerie ou de pièces de bois. Telle est la machine employée en grand; on en a construit des modèles pour les cabinets de physique; dans ces modèles la cloche *MN*, le réservoir *C*, et le conduit *EF* sont en verre, afin que les effets soient plus visibles.

Voici maintenant le jeu de la machine. Le liquide qui descend du réservoir s'écoule d'abord par les ouvertures *ccc;* mais bientôt ces ouvertures sont fermées par les boules. Le liquide ainsi arrêté tout-à-coup, exerce une pression contre toutes les parties intérieures de la machine, et soulève les globes *kk*, de sorte qu'il passe une certaine

quantité d'eau dans la cloche; cette eau tombe dans les cavités dont il a été question, et monte dans le tuyau *EF*. Après ce premier effet, la vitesse acquise du liquide se trouvant singulièrement affaiblie, les soupapes *k k* se ferment par leur propre poids. Les soupapes *c c c* s'ouvrent en vertu de leur poids et de la réaction des parois du tuyau horizontal, et les mêmes effets recommencent. L'écoulement par le tuyau vertical serait interrompu, comme le jeu des soupapes, sans l'air de l'intérieur de la cloche, qui, étant comprimé par l'introduction du liquide, rend cet écoulement continu. Le belier hydraulique a déjà été employé dans beaucoup de circonstances.

De quelques Instrumens communément employés.

53. Les instrumens le plus fréquemment employés dans les recherches scientifiques, sont le thermomètre, le baromètre, l'hygromètre, le microscope, la machine pneumatique, la balance, le vernier, la vis, le comparateur et le sphéromètre.

Il a été question de la balance n° 34; nous nous occuperons plus tard des cinq premiers instrumens; nous ne parlerons ici que du vernier, de la vis, du comparateur et du sphéromètre, lesquels sont spécialement consacrés à mesurer l'étendue.

La règle et le compas sont d'un usage trop constant et trop général pour qu'il ne soit pas superflu de les considérer ici.

Le *vernier* a reçu son nom du géomètre français qui l'a imaginé. Cet instrument fournit le moyen d'avoir des parties d'une extrême petitesse. Soit une règle *AB* (*fig.* 44), divisée en dix parties; soit une ligne *C D*, dont on désire connaître la longueur : on la posera sur la règle; elle couvrira

un certain nombre de divisions, 9 par exemple, plus une fraction de division. C'est cette fraction qu'il s'agit d'évaluer d'une manière rigoureuse. A cet effet, on construit une seconde règle divisée en parties plus petites que celles de la première : dix de ces parties en recouvrent neuf de la première (*fig.* 45). Ces deux règles étant superposées et les extrémités *A* et *H* coïncidant, la première division de *H K* sera en arrière de la première division de *A B* de $\frac{1}{10}$ *D* (*D* étant une division de *AB*), la seconde de $\frac{2}{10}$ *D*, et ainsi de suite. Faites glisser maintenant la règle *H K* (*fig.* 46) de manière que la première division de cette règle corresponde à celle de *AB*. Il est visible que sa dernière division sera avancée en même temps de $\frac{1}{10}$ *D*; cette dernière division avancera de même de $\frac{2}{10}$ *D*, si l'on applique la seconde division de *H K* sur la seconde de *A B*. Si le point *D* de la règle *C D* tombait en *K*, on aurait la longueur de cette règle, qui serait de 9 divisions de *A B* plus $\frac{2}{10}$ de division. Si le point *D* tombait entre deux dixièmes, on évaluerait approximativement la fraction. On aurait une exactitude plus grande si le vernier embrassait un plus grand nombre de divisions de la règle *A B*. Il faut cependant dire qu'il y a une limite à cette division. Cette limite naît de la difficulté de bien observer la coïncidence des parties.

On applique, avec la même facilité, le vernier aux divisions circulaires. Dans beaucoup de circonstances le vernier glisse à frottement le long de la règle (baromètre); quelquefois on le fixe à une vis afin que son mouvement soit lent et gradué.

De la Vis.

54. On emploie souvent la vis pour diviser une longueur donnée en parties égales, pour apprécier de très-pe-

tites distances; on fait, par exemple, usage de cet instrument pour partager les grandes divisions des tubes thermométriques en sous-divisions d'égale capacité; on suppose alors le diamètre le même dans toute la longueur de chaque grande division qui peut contenir dix degrés ou plus. Il est indispensable que les filets de la vis destinée à cet usage soient espacés avec une régularité parfaite (*fig.* 47). On peut juger si la vis remplit cette condition; pour cela on trace sur la tête *CD* une division circulaire, et l'on rapporte sa marche à un index fixe *A B*. Ainsi, supposons la division circulaire de 400 parties, en la tournant d'une seule, on fera avancer la vis de $\frac{1}{400}$ du pas; ce sera de $\frac{1}{400}$ de millimètre si le pas est d'un millimètre. Une vis bien travaillée, marchera toujours de la même quantité pour le même nombre de tours.

Du Sphéromètre.

55. On a employé la vis, disposée d'une certaine manière, à mesurer la courbure des verres sphériques et l'épaisseur des lames; on a donné à ce nouvel instrument le nom de sphéromètre. La figure 48 le représente : on voit que c'est la vis de la figure 47, placée dans une position verticale. Il est composé de trois branches d'acier horizontales, aux extrémités desquelles se trouvent trois tiges d'acier verticales et amincies en pointes *a a a* : au centre est la vis. La vis et les trois pointes *a a a* reposent sur un plan bien uni.

On reconnaît avec une grande facilité, par le moyen du sphéromètre, si la surface d'un verre est plane. On dispose le tout de manière que la pointe de la vis *c* touchant la surface du verre, les trois pieds soient aussi en contact avec le plan de verre sur lequel tout l'appareil repose. Si

on le fait glisser d'une petite quantité, la plus légère inégalité dans la surface sera aperçue par la moindre stabilité de l'appareil et par la nature du son qu'il rendra. Ce son sera très-différent de ce qu'il est quand les quatre points *a a a* et *c* reposent sur le verre. Veut-on juger de l'égalité de courbure d'une lentille? On posera les points *aaa* et la vis *c* sur la lentille, de manière que cette dernière soit au centre : la rotation de l'instrument rendra sensible le moindre changement dans la courbure, par les mêmes indices que ci-dessus. Quant à l'épaisseur d'une lame quelconque, elle peut être mesurée par le mouvement de la vis *C D*. Si l'on avait à craindre l'altération de cette lame, on la placerait sous une autre lame à faces tout-à-fait parallèles. L'instrument, tel que nous venons d'en faire la description, a été imaginé par M. Cauchois : un instrument, d'une forme différente et d'une destination analogue, connu sous le nom de sphéromètre, avait déjà été décrit par M. L. R. D. (*Journ. de Phys.*, 1776.) L'auteur se proposait surtout de mesurer les rayons de courbure des verres concaves et convexes. Ce sphéromètre a été employé à cet usage par Rochon et d'autres physiciens du temps.

L'application du sphéromètre à ce dernier usage repose sur cette proportion connue de géométrie : le sinus droit *OP* (*fig.* 49) est moyen proportionnel entre le sinus verse *AO* et la partie *OB* du diamètre comprise entre le sinus verse et la circonférence. Tout consiste donc à mesurer le diamètre *C D* et l'épaisseur *E F* d'un verre lenticulaire (*fig.* 50). Le premier est le double du sinus droit et le second le double du sinus verse. Par la proportion ci-dessus on aura *O B* et par suite *A B* double du rayon de courbure du verre.

Du Comparateur.

56. Le comparateur sert à constater l'égalité de deux longueurs, ou à apprécier leur différence si elles sont inégales. Cet instrument est composé d'une règle métallique *A B*, forte et droite (*fig.* 51). A l'extrémité *A* est un talon qui sert à appuyer les règles que l'on compare; un châssis mobile parcourt toute la longueur de la règle; on le fixe au point convenable par le moyen de vis. Ce châssis porte un tourillon *a*, autour duquel tourne un levier coudé *a b c*, dont les deux branches sont très-inégales. Le mouvement du bras *a c* est indiqué par un vernier. S'agit-il de comparer deux règles? on en placera une sur le comparateur, de manière qu'elle soit appuyée contre le talon *f*, et l'on amènera le bras coudé *b* en contact avec l'autre extrémité; on fixera le châssis et l'on notera le point de la division circulaire où s'arrêtera l'extrémité *C*. On enlèvera la règle et on y substituera l'autre, sans toucher au châssis; un ressort *F* poussera le bras *b*, et le fera appliquer exactement contre la règle. Si l'extrémité *c* correspond à la même division, les deux règles sont égales; dans le cas contraire, elles sont inégales, et l'on peut avoir la valeur de la différence. Par exemple, si l'extrémité *c* a marché de 3 lignes, et que le bras *a c* soit dix fois plus grand que le bras *a b*, la différence des deux règles sera $\frac{1}{10}$ de ligne.

DE LA CHALEUR.

Explication détaillée de la construction du Thermomètre.

57. Quand on veut diviser un corps solide en plusieurs parties, on éprouve de la résistance; cette résistance, variable pour chaque corps, et produite par l'attraction, serait sans doute beaucoup plus grande si les molécules étaient sollicitées par cette seule force; mais la chaleur, répandue dans l'intérieur de tous les corps, tend sans cesse à écarter les parties qui les constituent, et balance ainsi plus ou moins les effets de l'attraction moléculaire. A la cause inconnue des phénomènes de la chaleur, on a donné long-temps le nom de feu ou de matière de la chaleur. Lors de la réformation du langage chimique on l'a appelée *calorique*, dénomination généralement adoptée aujourd'hui.

Le calorique est tellement subtil, que toutes les recherches des physiciens, tendant à en constater la matérialité, ont été jusqu'ici sans succès. Aussi l'existence du calorique comme substance est-elle encore incertaine. Des physiciens d'un mérite, éminent l'ont même révoquée en doute et ont admis que la chaleur n'est que l'effet d'un mouvement intérieur qui détermine le rapprochement ou l'écartement des molécules selon les circonstances.

Ces deux hypothèses partagent aujourd'hui les physiciens. Nous adopterons celle dans laquelle on admet la matérialité du calorique, parce qu'elle est la plus commode pour l'explication des faits, et la plus propre à en faciliter la conception. D'ailleurs l'examen des phénomè-

nes de la chaleur nous permettra, par la suite, de discuter ces deux hypothèses.

Le calorique est un fluide très subtil qui pénètre tous les corps et augmente en général leur volume à mesure qu'il s'y accumule. Introduit dans les corps, il s'en échappe continuellement sous forme de rayons. Si deux corps sont en présence l'un de l'autre, il s'établit entre eux des échanges de calorique qui amènent bientôt l'égalité ou l'équilibre de température. La *température* d'un corps dépend de la tendance du calorique contenu dans ce corps à s'en échapper, et la température est plus ou moins élevée, selon que cette tendance est plus ou moins grande.

58. On a imaginé des instrumens appelés *thermomètres*, à l'aide desquels on peut mesurer la température des corps. L'invention du thermomètre date de la fin du seizième siècle; les physiciens ne sont pas d'accord sur l'auteur de cette invention; les uns pensent que c'est Galilée; d'autres prétendent que c'est Drebbel de Nord-Hollande : quoi qu'il en soit, nous allons donner une idée du thermomètre de Drebbel. Ce thermomètre consistait en un tube terminé par une boule remplie d'air; la partie ouverte du tube plongeait dans de l'alcool coloré; et comme par la chaleur on avait dilaté l'air de la boule, le liquide se tenait à une certaine hauteur dans le tube; ce petit appareil était appliqué sur une planche divisée; on jugeait du froid et du chaud par l'ascension ou l'abaissement de la colonne liquide. Les défauts de cet instrument sont trop apparens pour qu'on s'y arrête. Les académiciens de Florence donnèrent bientôt un thermomètre d'une forme semblable à celle du thermomètre à alcool. En soustrayant le thermo-

mètre à l'influence barométrique, ces physiciens l'avaient singulièrement perfectionné; mais leur instrument n'avait aucun point fixe, de sorte qu'il n'était comparable ni avec lui-même, ni avec les autres instrumens construits d'après le même procédé. Newton, dès 1701, avait senti la nécessité d'un intervalle constant; il prit l'eau bouillante et la glace fondante pour les deux points extrêmes de son thermomètre : il fit usage de l'huile de lin. Il paraît qu'Amontons, vers la même époque, prenait aussi le point de l'eau bouillante pour terme fixe.

Réaumur donna son thermomètre en 1730. Il se servit d'un alcool qu'on pouvait se procurer au même degré de pureté dans tous les temps et dans tous les pays, et qui depuis la congélation de l'eau jusqu'au point où il était le plus échauffé sans bouillir, se dilatait de $\frac{80}{1000}$ de son volume à zéro. De plus, chaque degré de son échelle était la millième partie de la capacité de la boule et du tube jusqu'à zéro. Réaumur employait pour la graduation de son thermomètre le procédé qu'on emploie encore aujourd'hui pour diviser les tubes destinés à la mesure des gaz. Il a bien connu les conditions auxquelles doit satisfaire un bon thermomètre; mais la congélation artificielle de l'eau, et la plus haute température que pouvait atteindre son alcool sans bouillir, ne sont pas aussi fixes qu'il le pensait. Deluc a beaucoup contribué à faire substituer le mercure à l'alcool, et à prendre la glace fondante et l'eau bouillante pour les points fixes.

59. Nous allons indiquer actuellement la construction du thermomètre, telle qu'on l'exécute aujourd'hui. Il faut d'abord faire choix d'un tube dont le diamètre intérieur soit le même dans toute sa longueur; à cet effet on fait couler une petite colonne de mercure dans le tube,

et si ce métal occupe le même intervalle, dans un point quelconque, le tube sera parfaitement cylindrique. Mais il est assez rare de trouver des tubes qui présentent cette égalité dans une longueur même d'un demi-pied. Il est donc utile de pouvoir diviser un tube quelconque en parties d'égale capacité; on y parvient en y introduisant une colonne de mercure *m b* qui en remplit plus que la moitié; on la fixe d'abord à une extrémité du tube; si l'on porte ensuite en *n* l'extrémité qui était en *b* (*fig.* 52), celle qui était en *m* va se trouver un peu au-delà du centre en *a*. Il est évident que les deux portions *m a* et *n b* sont égales en capacité, et qu'on trouvera le véritable milieu du tube si l'on divise la portion *a b* en deux parties d'égale capacité; mais cet intervalle est assez petit pour qu'on admette, sans erreur sensible, l'égalité du diamètre dans sa longueur. Il suffira donc de prendre le milieu de la ligne *a b*, la section qui partage le tube donné en deux portions égales tombera sur le point ainsi déterminé. On pourra en agir de même à l'égard de chaque moitié, et ainsi de suite; de sorte que le tube entier sera exactement divisé en parties d'égale capacité.

Ce procédé ingénieux, proposé par M. Gay-Lussac, est beaucoup plus commode que celui de Réaumur, surtout pour les tubes d'un petit diamètre, auxquels ce dernier n'est pas applicable.

Me sera-t-il permis de rapporter un procédé que j'ai souvent employé? Ce procédé consiste à introduire dan le tube qu'on veut graduer une colonne de mercure égal à peu près au dixième de sa longueur. Soit *a b* (*fig.* 5 cette colonne. On note avec de l'encre rouge, ou toute autre manière, les points *a* et *b*; on porte ensuite l' trémité *a* en *b* et l'extrémité *b* en *d*. Il est visible que

deux parties *a b* et *b d* sont égales en capacité; il en sera de même de toutes les autres parties ainsi obtenues. Le reste s'achève comme précédemment. Des thermomètres que j'ai ainsi construits ont été d'accord entre eux.

On souffle à une des extrémités du tube gradué, une boule ou un cylindre *R;* et à l'autre, un tube plus large et plus long *AB* (*fig.* 54). On chauffe d'abord le tube dans toute sa longueur, afin de le sécher : on verse ensuite du mercure bien sec par le grand tube; l'air se contracte par le refroidissement, et le mercure tombe dans le réservoir. On place le thermomètre sur un grillage incliné; on l'entoure de charbons rouges, et l'on porte ainsi le mercure à l'ébullition, afin de chasser complètement l'air et l'humidité qui restent adhérens aux parois intérieures du tube. Quand le mercure a suffisamment bouilli, et qu'il est refroidi, on vide le grand réservoir; on chauffe le mercure restant, afin d'en faire sortir une portion, et l'on fond l'extrémité du tube à la lampe, en ayant soin de la présenter à la flamme au moment où le mercure, qui se retire en vertu de la contraction qu'il éprouve, est encore peu éloigné du point que l'on veut fondre. En agissant ainsi, on expulse tout l'air du tube capillaire, où sa présence avait été considérée, jusqu'ici, comme très-nuisible; mais aujourd'hui que l'observation de M. Claussergue sur l'élévation que fait éprouver, au bout d'un certain temps, la pression atmosphérique au zéro du thermomètre, a été confirmée par les physiciens, il convient de laisser dans le haut du tube un petit réservoir *B* plein d'air (*fig.* 55). On le scelle lorsque le mercure est en *A*, limite de l'échelle du thermomètre. L'air de l'intérieur de ce petit réservoir faisant toujours sensiblement, par son élasticité, équilibre à la pression de l'atmosphère, empêche la varia-

tion du réservoir *R*, et conséquemment le déplacement du zéro. Si la colonne de mercure se divisait par suite de l'introduction d'une bule d'air, on ferait tourner le thermomètre avec force, et bientôt l'air rentrerait dans le petit réservoir *B*. Il reste à prendre les points fixes.

Le zéro s'obtient de la manière suivante. On plonge dans la neige toute la partie du thermomètre qui contient du mercure; le lieu de l'observation doit avoir une température supérieure à zéro, afin de commencer la fusion de la neige, et de donner conséquemment une température constante.

On sait que la liquéfaction d'un corps a toujours lieu à la même température. D'une autre part, c'est un fait général, dont nous développerons par la suite les nombreuses conséquences, que, toutes les fois qu'un corps commence à fondre, il conserve une température constante, jusqu'à ce que la fusion soit complète; toute la chaleur fournie au corps est employée au changement d'état. Ce point de la fusion de la neige ou de la glace est plus certain que celui de la congélation artificielle de l'eau : le premier a lieu à la même température, dans tous les temps et dans tous les lieux; le second présente beaucoup d'incertitude, car l'expérience a prouvé que l'eau pure peut, dans certaines circonstances, rester liquide, même à 12° au-dessous de zéro.

Le second point fixe est celui de l'eau bouillante; un thermomètre qu'on y plonge se maintient au même point pendant tout le temps de l'ébullition. Ce fait est aussi général que celui de la fusion de la neige; mais il est bon d'indiquer plusieurs précautions propres à assurer l'exacte détermination de cette température. D'abord l'eau doit être parfaitement pure; une seule distillation suffit pour l'amener à cet état. Ensuite il faut que le vase

dans lequel on opère soit en métal; s'il était en verre ou en porcelaine, la température de l'eau bouillante pourrait éprouver des variations d'un à deux degrés et plus. La couche en ébullition ne doit pas dépasser deux pouces, afin que la vapeur qui se forme dans le fond du vase n'ait qu'une faible colonne à soulever. On ne peut pas se dispenser de consulter l'état du baromètre, car l'eau n'entre en ébullition à 100° qu'autant que la hauteur du mercure dans cet instrument est à 0^m, 76. Quand cette hauteur est plus petite ou plus grande que 0^m, 76, la température est inférieure ou supérieure à 100°. Mais comme on connaît la variation de la température correspondant à un changement donné dans la hauteur barométrique, on peut toujours ramener, par le calcul, le point de l'eau bouillante à la pression 0^m, 76 (1).

En prenant le zéro de l'échelle, nous avons déjà fait sentir la nécessité d'entourer de neige toute la partie du thermomètre qui contient du mercure. Il est aussi absolument nécessaire, pour avoir le second point, de donner la température de l'eau bouillante à toute la colonne, et pour cela il suffira de plonger le thermomètre dans la vapeur, parce que c'est un fait d'observation, que la température d'une petite couche de liquide en ébullition est la même que celle de la vapeur qui s'en échappe.

Pour faire cette expérience commodément, on construit un vase à double fond, en fer blanc ou mieux en cuivre (*fig.* 56); la partie *A B* contient l'eau; à cette première partie est adapté un tuyau *H K*, formé de plusieurs pièces emboîtées les unes dans les autres, et qu'on sépare à volonté; le thermomètre est introduit par l'ouverture *O*.

(1) D'après le révérend P. Wollaston, 27^{mm} de pression correspondent à un degré centigrade.

La disposition seule de ce petit appareil montre que le réservoir et la colonne de mercure sont entièrement plongés dans la vapeur, dont l'excès s'échappe par les ouvertures latérales *m* et *n*. Le point où s'arrête le mercure ne dépasse que d'une petite quantité le bouchon dans lequel est retenu le thermomètre, de sorte que toute la colonne a sensiblement la température de l'eau; on peut d'ailleurs le faire monter et descendre.

Il est rare que les deux points fixes correspondent à des divisions entières; il est encore plus rare que l'intervalle entre ces deux points soit égal à 100 divisions; en sorte qu'on est obligé de faire une table pour chaque thermomètre ainsi construit. Pour les thermomètres destinés aux arts ou aux usages de la vie, on se borne à partager, sans graduation préalable, en cent parties d'égale longueur l'intervalle compris entre les deux points fixes. Dans tous les cas, les degrés sont pris positivement au-dessus de zéro et négativement au-dessous.

Le thermomètre dont nous venons de donner la construction avec détail, est connu sous le nom de thermomètre centigrade. Si l'intervalle compris entre la glace et l'eau bouillante est divisé en 80 parties, on aura le thermomètre appelé vulgairement thermomètre de Réaumur; ces deux thermomètres sont généralement employés en France, en Espagne et en Italie.

Le thermomètre en usage en Angleterre et en Allemagne a une division différente. Farenheit la proposa en 1724. Ce thermomètre est à mercure; il a pour termes fixes la chaleur de l'eau bouillante et le froid produit par un mélange à parties égales de sel marin et de neige. L'intervalle compris entre ces deux points est divisé en 212 degrés; le 32e degré correspond à notre zéro.

Le zéro de ce thermomètre présente quelque incertitude; car nous verrons à l'article des froids artificiels, qu'il faut la réunion d'un grand nombre de circonstances pour qu'un mélange réfrigérant produise le même degré de froid dans deux opérations différentes. On suit d'ailleurs aujourd'hui en Allemagne, pour le thermomètre de Farenheit, la marche que nous venons de tracer; on note 32 le point de la glace fondante, et 212 le point de l'eau bouillante.

Le thermomètre employé dans le nord ne diffère que par sa division du thermomètre centigrade. Cet instrument est à mercure; la température de l'eau bouillante est marquée 150; celle de la glace est marquée zéro. La division proposée par Delisle, en 1733, a été abandonnée. Elle n'avait qu'un seul point fixe, celui de l'eau bouillante.

Il nous paraît tout-à-fait superflu d'avoir recours au calcul pour démontrer que deux thermomètres construits sur la même échelle et avec des masses inégales de mercure, doivent s'accorder; car chaque degré étant la centième partie de la dilatation de zéro à l'eau bouillante, les deux thermomètres plongés dans la même source de chaleur, marqueront nécessairement le même nombre de degrés.

Il est souvent utile de traduire dans le langage de notre thermomètre les résultats d'observations faites avec les autres instrumens. Rien n'est plus simple que cette transformation; car 80 degrés de Réaumur, 180 de Farenheit, 150 de Delisle, correspondant à 100 degrés du thermomètre centigrade, il suffira d'une simple proportion pour l'opérer. Veut-on, par exemple, réduire 65 degrés de Réaumur en degrés centigrades? on aura $80 : 100 :: 65 : x = 65 \times \frac{100}{80} = 81^{\circ},25$.

Il faut avoir l'attention de retrancher préalablement 32, du nombre de degrés de Farenheit. Ex., pour savoir à quel degré centigr. correspond le 115e degré de Far. on fera la proportion 212 — 32 : 115 — 32 :: 100 : $x = 46°,11$.

Voyez la météorologie pour le thermomètre propre à connaître les températures maximum et minimum. *Voy.* la fin des dilatations pour la théorie complète du thermomètre et les divers pyromètres destinés aux températures élevées. *Voyez* encore les additions pour les calculs à l'aide desquels on établit la comparaison du thermomètre à air avec le thermomètre à mercure.

Thermomètre différentiel.

60. Il est des circonstances où le thermomètre, sous la forme que nous venons de lui donner, ne peut pas servir. Par exemple, quand il s'agit de mesurer la chaleur réunie par la réflexion au foyer d'un miroir, les indications du thermomètre ordinaire, sensible aux variations du milieu environnant, seraient erronées. M. Leslie a imaginé un instrument qu'il nomme *thermomètre différentiel*, et dont la marche est indépendante de la température du milieu; le tube de cet instrument a la forme d'un U, dont chaque branche est terminée par une boule. L'auteur donne à l'une de ces boules le nom de *boule focale*, parce qu'elle occupe le foyer du miroir réflecteur. Cette boule étant échauffée, l'air de son intérieur se dilate et chasse vers l'autre boule une colonne d'acide sulfurique coloré. On gradue ce thermomètre en établissant une différence de dix degrés entre les températures des deux boules; pour cela on laisse la boule focale en contact avec l'air, et l'on entoure l'autre boule d'une éponge humide, jusqu'à ce qu'il y ait dix degrés de différence. On conçoit la possibi-

lité de donner plus ou moins de sensibilité à cet instrument. La figure 57 le représente.

Le thermoscope de M. de Rumford (*fig.* 58) n'est que le thermomètre différentiel sous de plus grandes dimensions. Nous ferons connaître bientôt des expériences dans lesquelles de pareils instrumens sont indispensables pour trouver des résultats conformes à la vérité.

Propriétés les plus générales de la chaleur.

61. 1°. La chaleur émane de tous les corps, sous forme de rayons. On peut s'en assurer en plaçant autour d'un corps chaud, dans une position quelconque, un thermomètre sensible; cet instrument manifeste, par la dilatation du liquide qu'il renferme, l'absorption de la chaleur : l'effet ne peut pas être attribué à la propagation par le milieu environnant, puisqu'une pareille transmission a lieu dans le vide, et produit à distance égale le même effet, quelle que soit la position du thermomètre.

2°. La chaleur se réfléchit comme la lumière, en faisant l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion. Pour mettre cette propriété en évidence, on place deux miroirs sphériques concaves en face l'un de l'autre, et de manière qu'ils aient leur axe commun.

On comprendra facilement cette expérience, si l'on se rappelle que le foyer F d'un miroir sphérique est sur le milieu du rayon. Ainsi un rayon lumineux mm' (*fig.* 59), tombant en m, parallèlement à l'axe des deux miroirs, se réfléchit et passe par le point F, milieu du rayon BC : il en sera de même de tout autre rayon parallèle à l'axe BB'. Si l'on mesure les angles FmC et $m'mC$, on les trouvera parfaitement égaux. Maintenant, puisque l'effet d'un corps chaud placé au foyer F' du second miroir, se concentre presque en totalité au foyer F du

premier, il faut que, dans sa réflexion, la chaleur fasse un angle égal à l'angle d'incidence. L'échauffement du corps froid n'est pas dû à une transmission directe; car, en le plaçant dans un autre point *H* plus rapproché du corps chaud, il est beaucoup moins échauffé. Cette expérience est très-ancienne; Mariotte, dans son Traité des Couleurs, en fait déjà mention, en 1717. Dufay, en 1726, fit voir qu'on pouvait ainsi enflammer des corps combustibles à plus de 50 pieds de distance; que la chaleur traversait cet intervalle dans un instant inappréciable.

Nous citerons une expérience de sir H. Davy, qui peut s'exécuter dans le vide. Elle consiste à réunir les deux extrémités d'une pile voltaïque par un morceau de charbon *c*, placé au foyer d'un miroir *mn* (*fig.* 60) (*voy.* la Pile). Bientôt le charbon devient incandescent, et échauffe un thermomètre très-sensible dont le réservoir *a* occupe le foyer d'un second miroir *m'n'*. La position du corps chaud ne permet pas d'attribuer au mouvement de l'air l'effet produit sur le thermomètre, puisque ce fluide devient plus léger en devenant plus chaud, et conséquemment tend à s'élever. D'ailleurs le vide peut être fait dans le large tube qui renferme cet appareil. (*Elements of chem. phil.*, vol. I.)

3°. L'intensité de la chaleur est en raison inverse du carré de la distance. Par l'expérience on reconnaît que l'intensité décroît rapidement; mais on se rendra facilement raison de la loi du décroissement, si l'on suppose un corps chaud placé au centre de plusieurs sphères concentriques; chacune de ces sphères, prise isolément, recevra sur sa surface la même quantité de chaleur; et comme leurs surfaces sont proportionnelles aux carrés de leurs rayons (distances du corps chaud à leurs surfaces), il en résulte que l'intensité de la chaleur sur chacune de ces sphères, sera

en raison inverse du carré de son rayon ou de la distance de sa surface au corps chaud : ce qu'on voulait démontrer.

4°. Tous les corps se laissent pénétrer par la chaleur rayonnante; le passage de la chaleur dans l'intérieur des substances diaphanes a donné lieu à des recherches ingénieuses, dont nous rapportons ici les résultats les plus remarquables.

La chaleur obscure de nos foyers ne traverse que difficilement le verre (*Mariotte*, t. Ier, p. 228), et même il paraît que celle qui émane d'un matras rempli d'eau bouillante ne le traverse pas du tout.

Laroche, il y a un petit nombre d'années, a fait voir *que la perte, dans le passage de la chaleur à travers les substances diaphanes, est d'autant moindre que la température des corps dont elle émane est plus élevée.* Le tableau suivant montre bien la proportion décroissante de la perte.

Température du corps chaud.	Effet sans verre.	Effet avec verre poli.	Effet avec verre noirci.	Différence.	Rapport.
182°	3°,94	0°,22	0°,07	0°,15	$\frac{15}{394}=\frac{1}{26}$
346°	16°,33	1°,36	0°,17	1°,19	$\frac{119}{1633}=\frac{1}{14}$
960°	38°,97	11°,83	0°,40	11°,43	$\frac{1143}{3897}=\frac{1}{3}$

Les trois premières colonnes n'ont pas besoin d'explication. La quatrième renferme les résultats obtenus avec la lame de verre couverte de noir de fumée. On a fait cette expérience, afin de connaître l'effet dû à l'échauffement produit par le verre; et, en retranchant le résultat fourni par le verre noirci, de celui qu'a fourni le verre poli, on a au moins l'effet dû à la transmission. La cinquième colonne expose les résultats ainsi diminués. Enfin, la sixième donne les rapports de la chaleur transmise par le verre, à

la chaleur envoyée par le corps, notée dans la seconde colonne.

D'après le tableau, de toute la chaleur émise par un corps à 182°, il n'en passe que $\frac{1}{26}$ à travers le verre, tandis que, si ce même corps est porté à 960°, une portion beaucoup plus grande ($\frac{1}{3}$) peut le traverser.

Le même physicien a également établi que *la chaleur qui a traversé une lame de verre, éprouve dans le passage à travers une seconde lame, une perte proportionnellement beaucoup moindre.*

Le tableau ci-joint fait connaître le rapport entre les deux effets.

Boulet de fer refroidi au point d'être obscurci	Effet produit sans écran.	Effet produit avec un écran transparent.	Effet produit avec un écran de verre noirci.	Excès de l'effet obtenu par l'écran transpar., sur celui qui a été obtenu avec l'écran noirci.	Rapport.
	34°12	4°70	0,33	4,37	$\frac{4,37}{34,12} = \frac{1}{8}$

Si l'on ajoute un second écran, l'effet sur le thermomètre sera de 2°,43, le rapport entre l'effet produit par ce double écran et l'effet produit par l'écran simple, sera $\frac{2,43}{4,37} = \frac{1}{2}$.

Laroche a encore fait voir qu'un verre *épais*, quoique plus perméable à la lumière qu'un verre *mince* de moins belle qualité, laisse passer beaucoup moins de chaleur rayonnante, et que la différence est d'autant plus petite que la température est plus élevée.

5°. L'inclinaison de la surface, par rapport à une direction déterminée des rayons calorifiques, a aussi une influence sur l'intensité de l'effet produit. M. Leslie a reconnu le premier par l'expérience que l'action d'une surface rayonnante est proportionelle au sinus de l'angle formé par cette surface avec la direction des rayons émis.

Pour constater cette propriété de la chaleur rayonnante, placez en face d'un miroir concave un cube plein d'eau à une température déterminée; mesurez l'effet produit sur la boule focale d'un thermomètre différentiel, placé au foyer de ce miroir; inclinez ensuite le cube, en le faisant tourner sur une ligne passant par son centre et perpendiculaire à l'axe du miroir; vous observerez que, quelle que soit l'inclinaison, l'effet sur le thermomètre différentiel restera le même. Il est bien entendu que, pour chaque position de la surface, il faut remettre le cube et le thermomètre dans le même état qu'au commencement de la première expérience, et que de plus la surface chaude est assez étendue pour que sa projection sur le miroir couvre toujours complètement l'ouverture d'un écran placé vis-à-vis du miroir. D'où il résulte qu'en général le pouvoir rayonnant d'une surface évaluée dans une certaine direction, est égal à celui de sa projection sur une surface perpendiculaire à cette direction. Ainsi la surface polygonale ou la demi-sphère *A C D B* (*fig.* 61) n'échauffe pas plus dans la direction *T L* que la face plane *A B* (1).

6°. Le même corps porté à la même température n'émet pas toujours la même quantité de chaleur; moins il en émet et plus il est propre à en réfléchir. Ainsi le pou-

(1) Soit *AC* la face perpendiculaire à la direction *HK* des rayons, *CD* la face inclinée; la portion de la face *CD* qui échauffe le miroir, est à la portion de la face *AC* qui produit le même effet comme 1 est à sin *CDF* ou sin *DOK*. Il faut donc que l'intensité de la chaleur qui part de *CD* dans la direction *HK*, soit à l'intensité de la chaleur partie de la face perpendiculaire *AC*, comme sin *DOK* est à 1 (fig. 62); les pouvoirs rayonnans r et r' de deux surfaces, faisant avec la direction *HK* des angles a et a', seront donc dans le rapport direct des sinus de ces angles, c'est-à-dire qu'on aura

$$r : r' :: \sin a : \sin a'$$

voir émissif du fer poli est faible, tandis que son pouvoir réfléchissant est considérable; c'est le contraire pour le fer rouillé. Nous reviendrons sur ce sujet intéressant à l'article *rayonnement*.

7°. L'action répulsive de la chaleur qui produit la dilatation paraît, d'après les expériences de M. Fresnel, s'exercer aussi à des distances sensibles.

DES DILATATIONS.

62. Tous les corps changent de volume lorsqu'ils changent de température. Les variations des dimensions des corps ont dans les expériences une influence dont il faut savoir tenir compte.

La connaissance exacte de ces changemens est une des plus importantes de la physique; sans cette connaissance on n'aurait qu'une idée très-imparfaite du thermomètre, et il serait tout-à-fait impossible d'approfondir la théorie de la chaleur. C'est pourquoi nous ferons l'étude des dilatations avec un grand soin.

Nous exposerons d'abord les procédés à l'aide desquels on les détermine; nous citerons ensuite les principales applications.

Dilatation des gaz.

63. Nous commencerons par les gaz, parce que ces corps présentent dans leur dilatation une grande régularité. Tous se dilatent de la même manière et de la même quantité. Leur coëfficient de dilatation a la même valeur pour chaque degré de l'échelle thermométrique. Pour déterminer avec précision la dilatation, il faut connaître le volume soumis à l'action de la chaleur. On fait choix d'un tube gradué semblable à celui du thermomètre et l'on y soude une boule ou un cylindre. On trouve la capacité de la

boule et celle d'une division du tube, en pesant le petit appareil d'abord vide, puis plein de mercure jusqu'à la première division, et enfin complètement plein du même métal; on a soin de faire bouillir le mercure, afin de chasser l'air et l'eau qui adhèrent aux parois du verre.

Soit p le poids de l'appareil vide, p' le poids de l'appareil rempli de mercure jusqu'à la 1re division, $p'-p$ sera le poids du mercure contenu dans la boule : soit p'' le poids de l'appareil totalement rempli de mercure, $p''-p'$ représentera le mercure que renferme tout le tube depuis la première division; et si n est le nombre des divisions, $\frac{p''-p'}{n}$ sera la quantité de mercure contenue dans chaque division. On a donc, par cette opération, le rapport entre la capacité d'une division du tube et celle de la boule prise jusqu'à la première division et même jusqu'à une division quelconque.

Le gaz soumis à l'expérience doit être parfaitement desséché (1); on l'obtient ainsi en fixant au tube rempli de mercure, un autre tube plus large renfermant du chlorure de calcium fondu (*fig.* 63). On renverse ce petit appareil, on le secoue, le mercure tombe, et l'air entre dans le tube, desséché par son passage sur le chlorure; on s'arrange de manière à laisser dans le tube une petite colonne de mercure, qui reste à peu de distance de la boule, quand elle est plongée dans la glace : on parvient aisément à ce résultat par un peu de tâtonnement.

Maintenant il ne reste plus qu'à porter le gaz à diffé-

(1) Si le gaz n'était pas préalablement desséché, la vapeur de l'air contenu dans la boule se déposerait en partie à l'état de glace, quand la caisse serait à la température 0, et cette glace se réduirait en vapeur à une température plus élevée.

rentes températures. A cet effet, on place le tube horizontalement dans une caisse en fer blanc, remplie d'abord de glace, ensuite d'eau à 10°, à 20°, etc., jusqu'à 100 degrés; on a soin à chaque opération d'enfoncer le tube jusqu'à l'index *m*. La température de l'eau est donnée par plusieurs thermomètres. On reconnaît, en faisant cette expérience avec un gaz quelconque, que l'index marche, pour un même nombre de degrés, d'un égal nombre de divisions; la dilatation est donc une même fraction du volume à zéro. Ce procédé a été mis à exécution à peu près en même temps par M. Dalton en Angleterre, et M. Gay-Lussac en France : le premier a trouvé 0,00372, et le second 0,00375, pour la dilatation correspondant à chaque degré centigrade. Le nombre de M. Gay-Lussac, qui s'accorde avec celui qu'a donné l'astronome Tobie Mayer, pour l'air, paraît être le véritable nombre.

L'air humide, dans le même appareil, se dilate comme l'air desséché; la vapeur d'éther sulfurique se dilate encore de la même manière : il est, d'après cela, très-probable que toutes les vapeurs ont le même coëfficient de dilatation que les gaz permanens.

M. Charles avait constaté depuis long-temps l'égale dilatation des gaz, comme le déclare M. Gay-Lussac dans son Mémoire; mais il ne s'était occupé ni des gaz solubles, ni de l'étendue de la dilatation. Les résultats précédens ont été confirmés par les recherches de MM. Dulong et Petit, qui se sont assurés que la même uniformité de dilatation se soutenait dans l'intervalle de — 36° à + 300 degrés. Sir Humphry Davy vient de constater que le coëfficient de dilatation de l'air n'est pas changé par la raréfaction ou la condensation de ce fluide.

Les notions précédentes suffisent pour mettre le lecteur

attentif en état de faire, sur le volume des gaz, toutes les corrections qui ne dépendent que du changement de température.

1er exemple : *Porter à 45° un volume de 35lit,55 d'air pris à zéro.* Un volume quelconque se dilate de 0,00375, pour chaque degré; 35lit,55, de 0° à 45°, se dilateront de 0,00375 × 45 × 35, 55, ce qui fait 5lit,999 pour la dilatation totale, qui, ajoutée au volume 35lit,55, donne 41lit,549 pour le volume dilaté à 45 degrés.

2e exemple : *Ramener à zéro un volume de gaz de 153lit,27 pris à 36°, 5.* Comme le coëfficient de dilatation 0,00375 est relatif au volume à zéro, on ne peut le faire porter que sur ce dernier volume. Supposons le connu et représenté par V : de zéro à 36°, 5, il serait augmenté de $V \times 0{,}00375 \times 36{,}5$, et serait devenu $V \times 1{,}137$; mais il est égal à 153,27. Il faut donc diviser 153,27 par 1,137, pour avoir le volume à zéro; en faisant l'opération, on a 134lit,815.

3e exemple : *Ramener à 36°,25 le volume 83lit.,547, pris à 11°,23.* On cherche d'abord le volume à zéro, en opérant comme dans le second exemple; on trouve qu'il faut diviser 83, 547 par $1 + 0{,}00375 \times 11{,}23$, ou par 1,042, ce qui donne 80lit.,179. Il faut ensuite, pour porter ce dernier volume à 36° 25, faire la même opération que pour le premier exemple, c'est-à-dire le multiplier par $1+0{,}00375 \times 36{,}25$, ou par 1,136; on trouve ainsi 91lit.,083 (1).

(1) Si V est le volume du gaz à une température t, et qu'il faille le porter à une autre température t', on voit par les exemples ci-dessus qu'on a d'abord le volume à zéro en divisant V par $1+0{,}00375\,t$. En multipliant le résultat par $1+0{,}00375\,t'$, on a $V\frac{(1+0{,}00375\,t')}{(1+0{,}00375\,t)}$ pour le volume demandé à la température t'.

Toutes les questions sur les volumes des gaz rentreraient dans les trois exemples ci-dessus.

Des Liquides.

64. La dilatation des liquides et des solides est loin de présenter la simplicité que nous avons trouvée dans celle des gaz; chacun d'eux a une *dilatation particulière, et le coëfficient qui l'exprime croît avec la température.* Si l'on pouvait se procurer un vase transparent, et conservant la même capacité à toutes les températures, rien ne serait plus simple que la détermination des dilatations des liquides; il suffirait de former un thermomètre avec chaque liquide, et de le porter à différentes températures. Mais comme toute matière, transparente ou opaque, varie dans son volume aux diverses températures, on doit avoir recours à un procédé qui donne la dilatation des liquides, indépendamment des changemens de la capacité du vase qui les renferme. MM. Dulong et Petit (*An. chim. et phys.*, t. 17) ont suivi une méthode qui remplit cette condition; elle est fondée sur ce principe d'hydrostatique, que lorsque deux colonnes liquides sont en communication par un tube latéral, leurs hauteurs verticales sont en raison inverse de leurs densités (n° 42) : de sorte qu'en entourant de glace l'une des colonnes, en portant l'autre à une température connue, et en mesurant la hauteur de chaque colonne, on a tout ce qui est nécessaire pour connaître la dilatation absolue du liquide soumis à l'expérience, comme on le voit par un calcul assez simple (1).

(1) Si h et h' désignent les hauteurs des colonnes, aux températures t et t', d et d' les densités correspondantes; on a :

$$h : h' :: d' : d.$$

(Boile est le premier physicien qui ait indiqué cette méthode.)

Les hauteurs des colonnes étaient déterminées par une lunette qu'on faisait mouvoir le long d'une règle verticale bien fixée.

La température était connue par le moyen d'un thermomètre à air et d'un thermomètre à mercure très-sensibles. Les résultats des expériences démontrent, pour le mercure, la loi générale que nous avons déjà énoncée sur l'accroissement du coëfficient de dilatation avec la température.

Température du thermomètre à air.	Dilatations absolues moyennes du mercure.	Températures indiquées par la dilatation du mercure, supposée uniforme.
0	0	0
100	$\frac{1}{5550}$	100
200	$\frac{1}{5425}$	204,61
300	$\frac{1}{5300}$	314,15

Mais d et d' sont en raison inverse des volumes V et V' qu'occuperait une même masse de liquide, aux températures t et t' ; on a donc :

$$d' : d :: V : V'.$$

D'où $h' : h :: V' : V'$ et par suite $\frac{h' - h}{h} = \frac{V' - V}{V}$. Or $\frac{V' - V}{V}$ exprime la dilatation du liquide pour l'intervalle de température $t' - t$ et pour l'unité de volume; comme cette expression est égale à $\frac{h' - h}{h}$, et que les hauteurs h' et h sont indépendantes du changement de volume subi par le tube pendant l'expérience, il en doit être de même de $\frac{V' - V}{V}$; $\frac{h' - h}{h}$ représente donc la dilatation absolue du liquide.

La première colonne contient les températures déduites de la dilatation de l'air.

La seconde renferme les dilatations absolues du mercure, entre zéro et chacune des températures indiquées dans la première colonne.

La troisième comprend les températures obtenues dans la supposition de la dilatation uniforme.

La dilatation du mercure, déterminée par les expériences précédentes, nous paraît ne rien laisser à désirer; elle est d'ailleurs peu différente de la dilatation $\frac{1}{5415}$, trouvée par MM. Lavoisier et Laplace.

La connaissance de la dilatation du mercure est indispensable dans un grand nombre d'expériences, et particulièrement dans les observations barométriques. Elle nous servira aussi plus loin pour déterminer la dilatation du verre, et, par suite, celle des métaux.

Nous joindrons ici quelques tables de dilatation, dont les résultats n'ont peut-être pas une grande précision, et qu'il est cependant utile de connaître.

Table de la dilatation de plusieurs liquides pour l'intervalle de zéro à l'eau bouillante.

Eau		$\frac{1}{22}$.
Acide hydrochlorique	(d^té 1,137)	$\frac{1}{17}$.
Acide nitrique	(d^té 1,40)	$\frac{1}{9}$.
Acide sulfurique	(d^té 1,85)	$\frac{1}{17}$.
Alcool	(d^té 0,817)	$\frac{1}{9}$.
Éther sulfurique		$\frac{1}{14}$.
Huiles d'olive et de lin		$\frac{1}{12}$.
Essence de térébenthine		$\frac{1}{12}$.
Eau saturée de sel marin		$\frac{1}{20}$.

Tableau indiquant les degrés marqués par des thermomètres construits avec différens liquides. (Recherches sur les Modifications, etc., p. 271.)

Mercure.	Huile d'olive.	Huile essent. de camomille.	Huile essentielle de thym.	Alcool.	Eau saturée de sel marin.	Eau.
80°	80	80	80	80	80	80
75	74,6	74,7	74,3	73,8	74,1	71
70	69,4	69,5	68,8	67,8	68,4	62
65	64,4	64,3	63,5	61,9	62,6	53,5
60	59,3	59,1	58,3	56,1	57,1	45,8
55	54,2	53,9	53,3	50,7	51,7	38,5
50	49,2	48,8	48,3	45,3	46,6	32,0
45	44,0	43,6	43,4	40,1	41,2	26,1
40	39,2	38,6	38,4	35,1	36,3	20,5
35	34,2	33,6	33,5	30,5	31,3	15,9
30	29,3	28,7	28,6	25,6	26,5	11,2
25	24,3	23,8	23,8	21,0	21,9	7,3
20	19,3	18,9	19,0	16,5	17,3	4,1
15	14,4	14,1	14,2	12,2	12,8	1,6
10	9,5	9,3	9,4	7,9	8,4	0,2
5	4,7	4,6	4,7	3,9	4,2	0,4
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
— 5				— 3,9	— 4,1	
—10				— 7,7	— 8,0	

Il est à regretter que Deluc n'ait pas donné les poids des liquides contenus dans les différens thermomètres; on aurait déduit du tableau précédent les dilatations absolues: ce tableau ne présente pas moins beaucoup d'intérêt.

65. M. Gay-Lussac a récemment fait de la dilatation des liquides le sujet de ses recherches; il a soumis à ses expériences l'eau pure, l'alcool, l'éther sulfurique et le sulfure de carbone. Ces liquides étaient parfaitement purifiés; il a supposé le volume de chaque liquide représenté par 1,000 à son point d'ébullition, et il a évalué le volume correspondant aux températures inférieures.

Tableau des Résultats.

	CONTRACTION.			
	Eau.	Alcool.	Sulfure de carbone.	Éther.
	0,0	0,0	0,0	0,0
	3,34	5,55	6,14	8,15
	6,61	11,43	12,01	16,17
	10,50	17,51	17,98	24,16
	13,15	24,34	23,80	31,83
	16,06	29,15	29,65	39,14
	18,85	34,74	35,06	46,42
	21,52	40,28	40,48	52,06
	24,10	45,68	45,77	58,77
	26,56	50,85	51,08	65,48
	28,56	56,02	56,28	72,01
	30,60	61,01	61,14	78,38
	32,42	65,96	66,21	
	34,02	70,74		
	35,47	75,48		
	36,70	80,11		

On voit par ce tableau que la contraction de chaque liquide diminue à mesure qu'on l'éloigne du point d'ébullition; que l'alcool et le sulfure de carbone se dilatent également, et que, comme d'après l'observation de M. Gay-Lussac, ces deux liquides portés aux températures respectives de leur ébullition, produisent des volumes égaux de vapeur. (*An. de Ch. et de Phys.*, t. II, p. 130.) Il paraîtrait d'après cela qu'il existe une certaine dépendance entre la dilatation d'un liquide et le volume de vapeur qu'il produit.

Dilatation des Solides.

66. Comme les dilatations des corps solides sont très-petites, il faut employer des procédés rigoureux pour les mesurer. Ces dilatations ont été le sujet de nombreux travaux; mais la plupart des instrumens imaginés pour cet objet sont affectés de causes d'erreur : nous exposerons les principaux procédés, avec assez de détails pour les

bien faire concevoir, et nous joindrons les résultats les plus remarquables qu'ils ont fournis.

1er *procédé*. MM. Lavoisier et Laplace ont fixé la barre métallique, dont ils voulaient connaître la dilatation, dans une position horizontale, contre un plan de verre; ce plan était maintenu dans une position verticale invariable. L'autre extrémité de la barre s'appuyait également contre une lame en verre mobile autour d'un axe horizontal, et dont l'extrémité faisait mouvoir une lunette dirigée sur une mire placée à une grande distance. Un allongement d'une ligne dans la barre métallique, soumise à l'expérience, faisait parcourir à la lunette, lorsque la mire était placée à 100 toises de distance, 744 lignes, ce qui donnait la facilité de diviser la ligne en 744 parties, et conséquemment la possibilité d'apprécier une dilatation de $\frac{1}{744}$ de ligne.

La barre était portée de la température de la glace fondante, à celle de l'eau bouillante; elle avait six pieds de longueur. L'erreur apportée par la dilatation des deux lames de verre, était négligeable par rapport à la dilatation de la longueur de la barre. La figure 64 peut donner une idée nette de l'appareil. *C D* est la barre métallique; *A B* la lame de verre fixe; *F K* la lame mobile autour de l'axe horizontal *O*; *L* la lunette; *P R* la mire. Les deux illustres académiciens français ont soumis à leurs recherches tous les métaux connus à l'époque de leurs expériences (1782).

Tableau des dilatations linéaires, d'après les expériences faites par MM. LAPLACE *et* LAVOISIER.

NOMS DES SUBSTANCES.	DILATATION LINÉAIRE. Depuis le terme de la congélation de l'eau jusqu'à celui de son ébullition. En Fractions ordinaires.	En fractions décimales.
Glace de Saint-Gobin.	$\frac{1}{1122}$	0,0008909
Tube de verre sans plomb. . .	$\frac{1}{1142}$	0,0008756
Tube de verre sans plomb. . .	$\frac{1}{1114}$	0,0008976
Autre tube de verre sans plomb.	$\frac{1}{1090}$	0,0009174
Flint-glass anglais.	$\frac{1}{1248}$	0,0008117
Verre de France avec plomb. .	$\frac{1}{1147}$	0,0008718
Cuivre.	$\frac{1}{581}$	0,0017173
Cuivre.	$\frac{1}{584}$	0,0017123
Cuivre jaune ou laiton.	$\frac{1}{535}$	0,0018782
Cuivre jaune ou laiton.	$\frac{1}{529}$	0,0018903
Fer doux forgé.	$\frac{1}{819}$	0,0012205
Fer rond passé à la filière. . . .	$\frac{1}{812}$	0,0012350
Acier non trempé.	$\frac{1}{927}$	0,0010791
Plomb.	$\frac{1}{351}$	0,0028484
Etain des Indes ou de Mélac. .	$\frac{1}{516}$	0,0019379
Etain de Falmouth.	$\frac{1}{462}$	0,0021730
Argent de coupelle.	$\frac{1}{524}$	0,0019084
Argent au titre de Paris.	$\frac{1}{524}$	0,0019084
Or de départ.	$\frac{1}{682}$	0,0014661
Or au titre de Paris, non recuit.	$\frac{1}{645}$	0,0015504
Or au titre de Paris, recuit. . .	$\frac{1}{661}$	0,0015128
Platine (selon Borda).	$\frac{1}{1167}$	0,0008569

Ces expériences n'avaient pas été publiées par les auteurs. Les résultats que nous venons de rapporter ont été conservés par les soins de madame de Lavoisier.

2° *procédé.* Il appartient à Ramsden, réunit beaucoup de

simplicité à beaucoup d'exactitude. La barre métallique a 5 pieds de longueur; elle est placée horizontalement dans une auge en cuivre remplie d'eau; cette eau, échauffée par douze lampes à alcool, est portée sans difficulté jusqu'à l'ébullition.

Deux auges en bois sont disposées parallèlement à l'auge en cuivre; chacune de ces auges renferme une barre de fonte; à chacune des deux extrémités de ces barres est un microscope maintenu dans une position horizontale et perpendiculaire à la barre. L'un de ces microscopes est pourvu d'un micromètre. D'abord les trois barres sont à la même température, par exemple à zéro; chaque microscope est dirigé à la fois sur les extrémités des trois barres. Si ensuite la barre qui est dans l'auge en cuivre est échauffée, tandis que les deux autres conservent la même température, on pourra, par le secours des microscopes, mesurer son accroissement en longueur. (*Philosoph. Transact*, v. 75, p. 480.) Pour cela, on ramènera les trois extrémités d'un même côté au même niveau, et, par le chemin que parcourra le microscope de l'extrémité opposée de la barre en cuivre, pour se trouver sur la droite qui réunit les extrémités correspondantes des deux barres en fonte, on jugera de la dilatation.

67. La dilatation en volume se détermine par un procédé plus simple que ceux que nous venons de décrire pour les dilatations linéaires, et il est susceptible d'une très-grande précision. MM. Dulong et Petit l'ont employé et l'ont exposé dans le mémoire que nous avons déjà cité. Ce procédé exige qu'on connaisse préalablement la dilatation absolue du mercure, et celle d'un corps solide, par exemple celle

du verre; cette dernière est la différence entre la dilatation absolue et la dilatation apparente du mercure; ainsi, D et d représentant les dilatations absolue et apparente du mercure, et V la dilatation absolue du verre, on aura $d = D - V$ ou $D = d + V$.

MM. Dulong et Petit se sont servis d'un tube de 6 décimètres de longueur, pouvant contenir à peu près 700 grammes de mercure, fermé à une de ses extrémités, et terminé à l'autre par un tube capillaire, dont la capacité n'était qu'une très-petite fraction de la capacité totale. Cet appareil était porté successivement de zéro à 100, à 200 et à 300 degrés. La dilatation apparente était donnée par la quantité du mercure qui sortait du tube à chaque opération. En effet, soit P le poids total du mercure contenu dans le tube à zéro; soit P' le poids du volume chassé par la chaleur, $\frac{P'}{P - P'}$ est le rapport entre le poids du volume sorti du tube, et le poids du volume restant, ce rapport exprime la dilatation pour t degrés, en divisant par t, on aura la dilatation du mercure pour l'unité de volume et l'unité de température. On substitue ici les poids aux volumes, ce qui est tout-à-fait permis, car à une même température les poids sont proportionnels aux volumes.

La dilatation apparente s'obtient encore d'une autre manière : supposons par exemple qu'on connaisse le rapport entre la capacité d'une division du tube d'un thermomètre et celle de la boule jusqu'à zéro; soit p la quantité de mercure contenu dans une division, soit P le poids total du mercure que renferme la boule, si maintenant pour un nombre t de degrés, le mercure se dilate de n divi-

sions, la dilatation apparente pour l'unité de volume et de température sera $D = \frac{p\,n}{p\,t}$.

Remarque. Les résultats sont les mêmes quelle que soit l'épaisseur des tubes, ce qui montre que le volume intérieur d'un vase a une dilatation égale à celle d'un pareil volume de la matière dont le vase est formé.

Tableau des résultats.

Températures déduites de la dilatation de l'air.	Dilatations apparentes moyennes du mercure.	Dilatations absolues du verre en volume	Températures déduites de la dilatation du verre, supposée uniforme.
100	$\frac{1}{6480}$	$\frac{1}{38760}$	100
200	$\frac{1}{6378}$	$\frac{1}{36300}$	213,2
300	$\frac{1}{6318}$	$\frac{1}{32900}$	352,9

Le nombre $\frac{1}{6480}$ de la dilatation apparente est un peu plus faible que $\frac{1}{6459}$ déduit des expériences de MM. Lavoisier et Laplace. Mais comme ces savans n'avaient pas fait bouillir le mercure dans le vase qu'ils ont employé, ils ont dû trouver une dilatation trop forte.

La troisième colonne renferme les résultats qui expriment la dilatation cubique du verre. Ils sont la différence entre les nombres de la seconde colonne et la dilatation absolue du mercure trouvée précédemment.

La quatrième indique les températures que marquerait un thermomètre en verre gradué entre zéro et l'eau bouillante.

La dilatation absolue du mercure et celle du verre étant connues, il est facile de déterminer la dilatation cubique des autres corps; par exemple, s'agit-il d'avoir la dilatation du fer? on introduit un petit cylindre de ce métal dans un tube que

l'on remplit de mercure, et l'on chauffe jusqu'à l'ébullition afin de chasser l'air et l'humidité. En laissant le tube se remplir à zéro, l'exposant ensuite à différentes températures, et pesant le mercure expulsé à chaque fois, on parvient à la dilatation du fer, car le volume sorti est égal à la somme des dilatations du fer et du mercure diminuée de la dilatation du verre. Pour exécuter ce calcul, il faut connaître le volume de chacun des corps, ce qui s'obtient en divisant le poids de chaque corps par sa densité à zéro. La capacité du tube est égale à la somme des volumes du fer et du mercure (1).

Si le métal pouvait être altéré par le mercure, on l'oxiderait légèrement à la surface, ou on le couvrirait d'une couche très-mince de vernis.

68. Quand on connaît, par le procédé dont il vient d'être question, la dilatation d'un corps solide, on détermine facilement la dilatation de tous les autres, en observant la marche d'un pyromètre formé par l'assemblage de deux règles réunies invariablement par une de leurs extrémités. C'est là le pyromètre employé par Borda et Deluc. *Voyez* la figure 65.

Dans les expériences de MM. Dulong et Petit, deux barres de 12 décimètres de longueur, de 25 millimètres de largeur et de 4 millimètres d'épaisseur, étaient réunies

---

(1) Soient V, V', V'' les volumes du fer, du mercure, et la capacité totale du tube; K, K', K'' les dilatations du fer, du mercure et du verre; t la température comptée à partir de zéro. On aura $VKt + V'K't - V''K''t = m$. m étant la quantité de mercure chassé du tube. Ou si l'on remplace les volumes par les poids, la formule devient $\left(\frac{P}{D}K + \frac{P'}{D'}K' - \left(\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}\right)K''\right)t = \frac{P''}{D''}$, où tout est connu à l'exception de K.

par une de leurs extrémités au moyen d'une traverse en fer, sur laquelle elles étaient fixées par de fortes vis. Chaque règle portait à son extrémité une tige de laiton s'élevant d'abord verticalement et se repliant ensuite horizontalement. Les branches horizontales étaient munies l'une d'une échelle divisée en cinquièmes de millimètres, l'autre d'un vernier. La dilatation linéaire ainsi obtenue n'étant que la différence entre les dilatations des deux métaux, et comme l'une d'elles était connue, l'autre s'en déduisait (1).

Ces deux règles plongées dans un bain d'huile étaient portées à différentes températures. Aucune des précautions nécessaires n'était négligée. En faisant cette expérience avec une lame de fer jointe successivement à des lames de cuivre et de platine, on a trouvé les nombres suivans (2) :

Températures du thermomètre à air.	Dilatations moyennes absolues du fer.	Dilatations moyennes absolues du cuivre.	Dilatations moyennes absolues du platine.
100	$\frac{1}{28200}$	$\frac{1}{19400}$	$\frac{1}{37700}$
300	$\frac{1}{22700}$	$\frac{1}{17700}$	$\frac{1}{36300}$

69. Les coëfficiens, fournis par le verre, le platine, le cuivre et le fer, prouvent que la dilatation des so-

(1) Soit l la longueur commune des deux barres; soit C le coëfficient connu de dilatation linéaire d'un métal; X le coëfficient inconnu de l'autre métal; t la température; N l'espace parcouru par la lunette; on a $Clt - Xlt = N$: d'où l'on tire la valeur de X.

(2) Le procédé du n° 68 donne les dilatations linéaires; en les triplant on a les dilatations cubiques. Pour justifier cette opération, soit 1 le côté d'un cube; si par l'effet de la chaleur ce côté devient $1 + d$, le cube deviendra $1 + 3d + 3d^2 + d^3$; mais il se réduira à $1 + 3d$, car, d étant une fraction très petite, $3d^2 + d^3$ peut être négligé, de sorte que la dilatation totale du cube sera $3d$, c'est-à-dire triple de la dilatation linéaire.

lides, rapportée au thermomètre à air, est croissante et qu'elle l'est inégalement pour chacun d'eux. Si l'on construisait des thermomètres avec des règles de ces corps, et si on les graduait à la manière ordinaire, ils donneraient au-delà de cent degrés des températures beaucoup plus élevées que le thermomètre à air. On tire des tableaux ci-dessus les rapports suivans :

Thermomètre à air.	Fer.	Cuivre.	Platine.	Verre.
0	0	0	0	0
100°	100°	100°	100°	100°
300°	372°,6	328°,8	311°,6	352°,9(1)

On voit que les indications du thermomètre de platine seraient les plus rapprochées de celles du thermomètre à air;

Que la dilatation du verre est très-croissante, puisqu'à trois cents degrés du thermomètre à air, le thermomètre de verre marquerait 352°,9; voilà pourquoi notre thermomètre à mercure ne marque que 307°,64, quand le thermomètre à air est à 300°, tandis que le mercure pris isolément donnerait 314°,15, comme le prouve le tableau de la dilatation de ce métal.

70. D'après ce qui précède, il est visible qu'aucun thermomètre solide ou liquide n'est comparable avec lui-même, puisque la dilatation de ces substances va en croissant avec la température. La variation de la dilatation est en

(1) Si l'on appelle T la température du thermomètre à air, t la température correspondante du thermomètre formé par une de ces substances, K et K' les coëfficients de dilatation entre 0 et 100, et entre 0 et T, il est visible qu'on aura $K : K' :: T : t$, d'où $t = \frac{T \times K'}{K}$. Dans le cas du fer on a $K = \frac{1}{8100}$ et $K' = \frac{1}{12700}$, et l'on trouve $t = 372°,6$.

général d'autant plus grande, que le corps est plus près de la température de son changement d'état. Si quelques substances ont un coëfficient de dilatation constant, ce n'est peut-être que l'air, l'azote, l'oxygène et l'hydrogène, les seuls corps que nous n'ayons pu faire changer d'état par la pression ou le froid; c'est donc au thermomètre à air que doivent être rapportées les températures. Mais la construction plus facile et l'usage plus commode du thermomètre à mercure déterminent les physiciens à l'employer dans presque toutes les expériences. Il est donc nécessaire de comparer la marche de ces deux instrumens. Déjà M. Gay-Lussac a fait voir qu'ils sont d'accord entre la glace fondante et l'eau bouillante; MM. Dulong et Petit ont plus récemment poursuivi la même comparaison entre — 36° et + 360°. Voici les rapports :

Températures indiquées par le thermomètre à mercure.	Températures indiquées par le thermomètre à air, et corrigées de la dilatation du verre.
— 36°	— 36°
0°	0°
100°	100°
150°	148°,70
200°	197°,05
250°	245°,05
300°	292°,70
360°	350°

(Les calculs qu'exige cette comparaison étant un peu compliqués, nous renvoyons le lecteur aux additions).

Pyromètres.

71. Quand les températures à déterminer surpassent 4 à 500 degrés, les vases en verre doivent être rejetés, vu qu'ils entrent en fusion à 500° à peu près. On substitue

alors aux thermomètres ordinaires, des thermomètres formés par des corps solides peu fusibles, qu'on appelle pyromètres.

Nous ne décrirons pas ici tous les *pyromètres* plus ou moins ingénieux, imaginés par les physiciens. Le grand nombre des parties de ces instrumens les rend en général fort imparfaits.

Le plus simple des pyromètres est celui qui porte le nom de Borda; il est formé par deux lames de métaux inégalement dilatables (*fig.* 66). Cet instrument laisse de l'incertitude sur les indications qu'il fournit aux températures supérieures à 350°, puisqu'au-delà de ce terme la loi des dilatations des métaux est inconnue. Cependant, en tenant compte de l'accroissement du coëfficient de dilatation, on obtiendrait, avec ce pyromètre, des températures plus exactes qu'avec aucun autre pyromètre connu. C'est un pyromètre composé d'une lame de cuivre et d'une lame de platine de la longueur de quatre mètres environ, et peu différent, par la forme, de celui que représente la fig. 66, que Borda et les autres astronomes français ont employé comme mesure linéaire dans les grandes opérations géodésiques, entreprises dans ces derniers temps.

Un autre pyromètre est encore fondé sur l'inégale dilatation de deux métaux; la figure 67 le représente: *A C B* est une tige de métal rectiligne; l'autre tige courbe *A D B*, est formée par un métal plus dilatable. Le changement de température fait varier la forme de l'arc *A B D*; on rend sensibles les variations par un levier coudé *FCL*, dont la marche est indiquée par un arc gradué *pr*. Cet instrument donne approximativement et les basses et les hautes températures; mais la complication de ce levier, de tiges de diverses sortes, fait qu'il est peu susceptible d'exactitude.

Ce pyromètre est connu sous le nom de pyromètre de Regnier. Quoique les instrumens de ce genre n'offrent pas une assez grande précision pour qu'on puisse regarder leurs indications comme très-rigoureuses, cependant leur emploi est quelquefois très-utile. Par exemple, veut-on que la température d'un four de porcelaine ne dépasse pas certaines limites; on place dans ce four un de ces instrumens, et on dirige le feu de manière que l'extrémité de la branche *C L* du levier corresponde toujours à la même division de l'arc *pr*. M. Brongniart met ce procédé en usage à la belle manufacture de porcelaines de Sèvres.

Le pyromètre de Wedgwood, habile manufacturier anglais, diffère essentiellement de tous les autres pyromètres. La partie principale de cet instrument est un prisme d'argile. Cette substance prend un retrait d'autant plus grand qu'elle est soumise à une température plus élevée (1). On fait d'abord glisser le prisme d'argile entre deux règles métalliques *a b* et *c d* (*fig.* 68), divisées en parties égales et inclinées entre elles. La longueur commune de ces deux règles est 30 centimètres; la différence entre les distances des deux extrémités, est environ de 3^{mm}; la distance moyenne est de 10^{mm}; chaque règle est divisée en 240 parties; chaque partie est un degré; le zéro est au niveau du plus grand écartement des règles; il correspond à peu près à 500° centigrades; chaque degré vaut 72 degrés centigra-

(1) Il ne faut pas voir dans cette contraction de l'argile par la chaleur, une contradiction à la loi commune des dilatations des corps. Ce phénomène tient à une combinaison plus intime des élémens; et lorsque la chaleur a été assez forte pour que la combinaison soit complète, l'argile suit la loi générale; elle se dilate par la chaleur, et se contracte par le froid.

des. Souvent, afin de rendre l'instrument plus portatif, on le partage en deux.

Le pyromètre de Wedgwood est nécessairement défectueux; il n'est propre qu'à donner un faible aperçu des températures.

On a trouvé que

		Wedgwood.		En degrés centigrades.
L'argent fond	à	28°	ou	2516
L'or	à	32°		2804
Le fer	à	150°		11300

Nous ne rapportons aucun autre nombre relatif au pyromètre de Wedgwood, parce que nous pensons que toutes les indications de cet instrument sont extrêmement erronées, et qu'elles sont en général beaucoup au-dessus de la vérité.

De tous les pyromètres, celui qui, dans l'état actuel de la science, nous paraîtrait mériter la préférence, serait le pyromètre à air, construit avec une boule creuse de platine, à laquelle serait adapté un tube en verre : la dilatation du platine serait, il est vrai, une cause d'erreur; mais comme la loi de cette dilatation est connue de 0 à 360°, on pourrait, par le calcul, l'étendre jusqu'à 500, 600 degrés, et plus, et affaiblir ainsi considérablement l'erreur. *Voyez* les notes pour ce dernier calcul.

L'importance de la connaissance des dilatations a été assez démontrée par la comparaison que nous avons faite des différens thermomètres (1); il ne nous reste plus qu'à citer quelques applications aux arts.

---

(1) Nous avons oublié de dire à l'article du thermomètre, que l'alcool est substitué au mercure pour les instrumens destinés à la détermination des grands froids, ce dernier liquide se congelant à — 39°, tandis que le premier ne se congèle à aucun froid connu.

Pendule compensateur.

72. On sait que la dilatation et la contraction des métaux opérées par les variations de température, sont les causes principales de l'irrégularité du mouvement des horloges. Si la verge du pendule s'allonge, l'horloge retarde; elle avance dans le cas contraire. La longueur d'un pendule est la distance entre le point de suspension et le centre d'oscillation (point où l'on conçoit réunie toute la masse en mouvement). On peut combiner les diverses parties de la tige de manière à compenser les effets de la chaleur et du froid.

Le pendule employé généralement aujourd'hui en France, a la forme qu'indique la figure 69. La verge de ce pendule est formée de deux métaux, le fer et le cuivre; la dilatation des tiges de fer tend à augmenter la longueur du pendule, leur contraction à la diminuer; les tiges de cuivre, comme le fait voir la figure, produisent un effet opposé. Par le calcul, on sait que les longueurs totales des tiges doivent être en raison inverse des dilatations linéaires des deux métaux; on satisfait d'abord approximativement à cette première condition, ensuite on achève la compensation par le tâtonnement, en portant le pendule à différentes températures, depuis celle de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante.

Graham, célèbre horloger anglais, avait proposé de former la tige du pendule avec un tube de verre que l'on remplirait en partie de mercure. Comme la dilatation de ce métal est beaucoup plus grande que celle du verre, une quantité peu considérable suffirait pour compenser les changemens de la longueur du tube de verre; la fi-

gure 70 représente ce pendule compensateur. Le centre d'oscillation de toute la masse de ce pendule est dans la colonne de mercure, parce que son poids surpasse de beaucoup le poids du tube. Par l'élévation de température, la dilatation du tube fait baisser ce centre; mais celle du mercure l'élève. Un pendule bien compensé peut être établi de cette manière. Il n'est pas en usage en France.

On voit dans la figure 71 un appareil de compensation imaginé, en 1738, par Julien Leroi, horloger français. Sur un support horizontal *C C*, repose un tuyau *A B* de laiton; au sommet *A* de ce tuyau est fixée l'extrémité d'une verge de fer *A E G*. Cette tige est interrompue en *h k*, où elle est composée d'un petit châssis *hk*, formé de deux lames flexibles; ce châssis passe dans la fente *p q*, faite dans le support *C C*. La longueur de la tige du pendule est donc réellement *G B*; par cette disposition, la dilatation du tuyau tend à faire monter la lentille *G*, tandis que la dilatation de la tige la fait descendre (1). Ce moyen de compensation a été abandonné, parce qu'il augmente inutilement le volume des horloges.

73. C'est encore en opposant la dilatation à elle-même, qu'on est parvenu à donner au mouvement du chronomètre une constance et une régularité presque parfaites.

---

(1) Supposons que cet appareil ait à une certaine température, à zéro, par exemple, les dimensions convenables. Soient a la longueur du tuyau $A B$; b la longueur totale $A G$, et l la longueur variable $B G$; on aura

$$l = b - a.$$

A une température t, si f et c sont les coëfficients de dilatation linéaire du fer et du cuivre, on aura

$$l(1 + f) = b(1 + f) - a(1 + c).$$

On emploie, dans ce dernier moyen de compensation, des lames doubles. Voici quelques détails sur ces espèces de lames.

Soit une lame rectiligne (*fig.* 72) formée d'une lame de cuivre *AB*, et d'une lame de platine *CD*. Supposons qu'au moyen de vis on fixe ces dernières l'une à l'autre d'une manière invariable, à une température déterminée. Cette lame composée perdra sa rectitude par le plus petit changement de température. Par l'élévation de la température, elle se courbera de manière que la lame de cuivre plus dilatable et par conséquent devenue plus grande que celle de platine, embrassera celle-ci dans sa concavité (*fig.* 73); le contraire aura lieu, par l'abaissement de la température (*fig.* 74).

On conçoit maintenant que, si l'on dispose transversalement à la tige d'un pendule une pareille lame, portant une petite masse à chacune de ses extrémités, on pourra combiner la longueur de la lame et le poids des masses, de manière que la distance entre le point de suspension et le centre d'oscillation du système soit constante (*fig.* 75). MM. Biot et Mathieu ont suivi une horloge dont le pendule était ainsi compensé, et lui ont trouvé une grande régularité.

74. Dans les montres, le régulateur du mouvement est un balancier *A B C* (*fig.* 76); ce balancier est mu par

---

Ainsi l' étant la longueur du pendule à la nouvelle température,

$$l' = b - a + (bf - ac),$$

et comme il faut que $l' = l$, on aura $bf = ac$. C'est-à-dire que les longueurs du tuyau de cuivre et de la tige de fer, doivent, pour la compensation, être en raison inverse des dilatations linéaires de ces deux métaux.

un ressort spiral *R R'* : si la température change, la force du ressort, les dimensions du balancier et du ressort changent aussi; et, par suite, la montre avance ou retarde. C'est pour éviter cet inconvénient qu'on a fixé au balancier des lames compensatrices *P* et *P'*, terminées par des masses en or; à force d'essais faits à des températures différentes, on finit par établir une compensation complète.

75. MM. Breguet, dont les chronomètres sont si justement renommés dans toute l'Europe, ont fait une heureuse application des lames compensatrices à la construction d'un thermomètre qui jouit d'une extrême sensibilité.

La partie principale de cet instrument est une hélice (*fig.* 77), formée de trois lames très-minces de métaux inégalement dilatables, réunies par pression à une haute température; les trois lames superposées, d'argent, d'or et de platine, ne forment ensemble qu'une épaisseur de $\frac{1}{50}$ de millimètre. L'hélice est fixée par le haut à un support en laiton, qui, par sa forme, la laisse dans un isolement parfait; l'extrémité inférieure porte une aiguille horizontale équilibrée par un poids; cette hélice, composée de métaux qui diffèrent par leur dilatabilité, doit se tordre ou se détordre, suivant la variation de la température, et entraîner dans son mouvement l'aiguille qui parcourt les divisions d'un cercle horizontal. Ce cercle est évidé dans le centre, afin que l'air n'éprouve aucun obstacle à se renouveler autour de l'hélice.

Il suffirait, à la rigueur, dans la construction de l'hélice, de superposer deux métaux, le platine et l'argent, par exemple; mais comme une semblable lame éprouve

des déchiremens dans les changemens brusques de température, MM. Breguet ont placé, entre le platine et l'argent, un troisième métal d'une dilatabilité moyenne : ils ont choisi l'or pur.

On connaît la valeur de chaque degré de ce thermomètre en comparant sa marche à celle d'un bon thermomètre à mercure. L'expérience prouve que l'aiguille, pour des changemens égaux de température, parcourt des arcs égaux; de sorte que l'instrument est comparable avec lui-même et avec les autres instrumens construits d'après les mêmes principes. On jugera par l'expérience suivante de l'extrême sensibilité de ce thermomètre métallique. MM. Breguet le placèrent sous un récipient de cinq litres de capacité, à la température de 19 degrés centigrades : ils firent le vide aussi promptement que possible; le thermomètre à mercure ne descendit que de 2 degrés, tandis que l'aiguille de l'hélice passa de + 19° à — 4° centigrades. Ils laissèrent ensuite rentrer l'air; l'index alla jusqu'à + 50° centigrades, tandis que le thermomètre à mercure descendait encore un peu, tant il avait mis de lenteur à prendre la température de l'air raréfié. Cette sensibilité, déjà très-grande, peut être portée encore plus loin, en agrandissant les dimensions de l'hélice, sans en augmenter la masse. (*Ann. ch. et phys.*, t. 5.)

L'avantage principal de cet instrument n'est pas dans sa sensibilité, mais dans la promptitude de ses indications; on peut rendre beaucoup plus sensibles de simples thermomètres à mercure, mais il est impossible de leur donner la dixième partie de sa promptitude à prendre la température des milieux.

La forme indiquée dans la figure 77 est la plus commune; mais au lieu de tourner la lame composée en hélice, on pourrait lui donner la forme d'une spirale, comme le représente la figure 78.

Changement d'état des Corps.

76. Les corps, en général, peuvent se présenter sous les trois états : solide, liquide, gazeux. Le soufre, l'iode, le camphre, sont solides à la température de la surface de la terre; mais, par une élévation de température plus ou moins grande, on les rend liquides, et même gazeux.

Chaque corps change d'état à une température particulière; le soufre devient liquide à 109 degrés, et passe à l'état de vapeur à environ 300 degrés.

La glace fond à zéro et se volatilise à 100 degrés.

La fusion du mercure a lieu à — 40 degrés, et sa transformation en vapeur à + 360 degrés.

Avant 1757, il était universellement admis qu'il suffisait d'ajouter à un corps, parvenu à la température de sa fusion, une petite quantité de chaleur, pour le faire fondre en totalité. A cette époque, le célèbre Black fit voir que cette opinion était contraire à la réalité, et démontra, par des faits incontestables, qu'un corps solide, au moment de sa transformation en liquide, absorbe une quantité de chaleur plus ou moins considérable, sans que pour cela sa température en soit augmentée; et que, si, par une circonstance quelconque, le corps liquide repasse à l'état solide, il abandonne la chaleur qu'il a absorbée pendant sa fusion.

On appelle *latente* la chaleur qui est absorbée dans le

changement d'état d'un corps, et qui ne contribue pas à l'élévation de sa température.

77. Pour avoir une idée de la chaleur nécessaire à la fusion des corps, qu'on prenne deux ballons égaux en poids et en volume; qu'on mette dans l'un de ces ballons un poids déterminé de glace à zéro, et dans l'autre un égal poids d'eau aussi à zéro; qu'on place les deux ballons dans une étuve, et qu'on suive attentivement la température du ballon primitivement plein d'eau; on verra qu'au moment où cette eau sera à 75 degrés, la glace de l'autre ballon sera totalement fondue, sans que sa température ait sensiblement varié. Comme les deux ballons sont placés dans les mêmes circonstances, ils doivent recevoir la même chaleur dans le même temps; il résulte de là qu'un poids donné de glace exige, pour passer à l'état liquide, une quantité de chaleur capable de porter un pareil poids d'eau de zéro à 75 degrés. On parvient au même résultat par le mélange d'une quantité quelconque de glace prise à zéro avec le même poids d'eau à 75 degrés, et l'on trouve que tout le mélange devient liquide et prend la température zéro. Il est clair que la chaleur perdue par l'eau pour s'abaisser à zéro, a été employée à la fusion de la glace.

78. Si, dans cette dernière expérience, au lieu de prendre l'eau à 75 degrés, on la prend, ce qui vaut mieux, à quelques degrés au-dessus de la température du milieu environnant, et qu'on la mélange avec une quantité de glace assez petite pour être fondue en totalité et augmenter dans sa température, on déduira aisément, de la température du mélange, le nombre qui exprime la chaleur latente de la glace.

Soient M le poids de l'eau, T sa température, m le poids de la glace, t la température du mélange : mt représentera la quantité de chaleur prise par l'eau provenant de la fusion de la glace; $M(T-t)$ la quantité de chaleur perdue par l'eau. Le premier produit est loin d'être égal au second. Il faut y ajouter la chaleur absorbée par la glace dans sa fusion. Si x représente le nombre de degrés de la chaleur latente, pour l'unité de poids, mx sera la chaleur latente pour le poids m. On aura donc la valeur de x en établissant l'équation de condition $mt + mx = M(T-t)$.

79. La chaleur absorbée par la fusion de la glace, ou de tout autre corps solide, doit reparaître dans le moment où le liquide reprend son état primitif. Parmi les différentes manières de rendre ce dégagement de chaleur manifeste, la suivante est une des plus simples : prenez un tube de 5 à 6 pouces de longueur, de $\frac{2}{3}$ de pouce de diamètre, rempli d'une dissolution de sulfate de soude saturée entre 30 et 40 degrés, et fermé après l'ébullition d'une portion du liquide. Cette dissolution, comme on le verra dans une autre circonstance, peut être agitée, sans qu'elle cristallise; mais si l'on brise l'extrémité effilée du tube, à l'instant même elle se prend en masse, et la chaleur dégagée est assez grande pour être sensible au toucher.

De même l'eau, dans le moment de sa congélation, abandonne toute la chaleur que la glace exige pour devenir liquide; c'est ce dégagement continuel de chaleur pendant la congélation de l'eau, qui fait qu'une masse de ce liquide, de quelques kilogrammes, ne se solidifie qu'après avoir été assez long-temps exposée à un froid même très-vif.

La grande quantité de chaleur absorbée par la fusion de la glace, nous fait concevoir pourquoi des quantités, même peu considérables, de cette matière, restent longtemps à l'air sans se fondre, quoiqu'elles soient sans cesse enveloppées d'une atmosphère dont la température surpasse celle de la glace fondante.

80. *Tableau des points de fusion des principales substances.*

Mercure à	— 39°		
Glace	0		
Phosphore	40	Potassium	58
Iode	107	Sodium	90
Soufre	109		
Etain	213		
Bismuth	283		
Plomb	322		
Cadmium	400 degrés environ.		

Nitre Potasse Soude Zinc Antimoine Sel marin Chlorure de potassium Chlorure de calcium Verre	à peu près à la température rouge.
Argent Cuivre Or Cobalt Nikel	forte température rouge.
Plâtre Phosphate de chaux Chrôme Fer Manganèse Poterie commune	exigent les plus hautes températures des forges.

Palladium Platine Urane Titane Cerium Rhodium Osmium Iridium	Chaux Silice, ou sable pur Baryte sèche Porcelaine dure Grès	infusibles au feu des forges fusibles au chalumeau d'oxigène et d'hydrogène.

Conversion des Liquides en vapeurs.

81. Des phénomènes, analogues à ceux que nous venons d'observer dans la fusion des solides, vont se présenter dans la volatilisation des liquides.

L'accroissement de la température d'un liquide, par la chaleur qu'il reçoit, a un terme qui est la température de son ébullition; un liquide quelconque, à son point d'ébullition, a acquis une force élastique capable de vaincre la pression à laquelle il est soumis. Ainsi, l'eau à 100 degrés peut soulever le poids de l'atmosphère.

Pendant tout le temps que dure la volatilisation d'un liquide, la température reste constante : toute la chaleur qui arrive n'exerce son action que pour hâter l'évaporation; plus il arrive de chaleur, plus l'évaporation est abondante : mais un thermomètre plongé au milieu du liquide, indique toujours la même température. Il est bien évident qu'il s'agit ici d'un liquide homogène, c'est-à-dire d'un liquide dont la partie qui se volatilise est tout-à-fait la même dans sa composition, que celle qui n'est pas encore volatilisée.

82. Cherchons maintenant à déterminer, par la voie de l'expérience, cette grande quantité de chaleur nécessaire à la constitution des vapeurs.

Nous prendrons d'abord l'eau pour exemple : ce liquide, parvenu à 100 degrés, qui est la température de son ébul-

tion, sous la pression moyenne de l'atmosphère, exige, pour se volatiser, une quantité de chaleur capable de porter de zéro à 535 degrés un pareil poids d'eau, si l'on avait un moyen quelconque d'empêcher son évaporation, ou bien seulement de zéro à 100° une quantité d'eau égale à 5,35 fois son poids. Pour constater cette propriété de la vapeur, nous mettrons dans une cornue *A B* (*fig.* 79) de l'eau pure; nous chaufferons peu à peu cette eau jusqu'à la faire volatiliser, et nous recevrons la vapeur dans un flacon *H K* contenant 5,35 fois autant d'eau qu'il y en a dans la cornue. On verra qu'après la volatilisation de l'eau de la cornue et sa condensation dans le flacon, le thermomètre plongé dans ce dernier marquera 100 degrés. La vapeur condensée conserve également 100 degrés; elle n'a donc perdu que la chaleur latente, qui a élevé de 100 degrés 5,35 parties d'eau à zéro, et qui aurait conséquemment élevé de 535 degrés la température d'une partie de ce liquide égale en poids à la vapeur.

83. Cette manière de faire l'expérience est très-simple; mais, pour déterminer la chaleur latente de la vapeur avec plus de précision, on la reçoit dans une plus grande masse d'eau froide contenue dans un vase en cuivre; voyez la figure 80. *A B* est le vase qui fournit la vapeur, *C D* le serpentin dans lequel elle vient se condenser : ce serpentin est entouré d'une quantité d'eau connue; le poids de la caisse en cuivre est également connu : *m n* est un écran pour défendre la caisse de l'action du fourneau, et l'ouverture *O* est destinée à donner passage à l'air de la cornue chassé par la vapeur.

En faisant l'expérience avec cet appareil, si on prend avec soin le poids de la vapeur condensée et le poids de

l'eau froide, la température de la vapeur avant et après la condensation, la température de l'eau froide au commencement de l'expérience, on peut déterminer avec beaucoup d'exactitude la chaleur latente de la vapeur d'eau.

Le calcul est absolument le même que celui que nous avons fait pour la glace.

Soient m et T la masse et la température de la vapeur, M et t la masse et la température de l'eau froide, T' la température du mélange, on tirera X, chaleur latente de l'unité de masse de vapeur d'eau, de l'équation : $m\,(T-T')+m\,X=M\,(T'-t)$.

Je ferai l'application de cette formule à une de mes expériences.

M, ou la masse d'eau froide, est 15956,30 grammes; la caisse et le serpentin en cuivre pèsent $3107^{g},3$: la capacité du cuivre rapportée à l'eau étant 0,0950, cette masse de cuivre représente $295^{g},19$ d'eau; ainsi la quantité totale d'eau à échauffer est $16251^{gr},49$.

m, ou la masse de vapeur d'eau condensée est $204^{gr},8$.

La vapeur était à 100°, la température de l'eau froide était de 22°, le mélange marquait 29°,58.

La vapeur a perdu 100° — 29°,58, ou 70°,42 de température.

L'eau a gagné 29°,58 — 22° ou 7°,58.

On déduit de là 531,07 pour la chaleur latente de la vapeur d'eau sous la pression moyenne de l'atmosphère.

Le nombre 535, donné plus haut, est la moyenne de plusieurs expériences analogues. La quantité énorme de chaleur latente de la vapeur d'eau, en fait concevoir l'emploi si fréquent aujourd'hui pour le chauffage des ateliers, et des bains de teinture, pour la cuisson des comestibles,

pour le blanchissage du linge, pour la dessiccation de la poudre, etc.

Il m'a paru curieux de déterminer les chaleurs latentes des vapeurs les mieux connues dans leurs propriétés.

Les liquides soumis à mes expériences sont : l'eau, l'alcool, l'éther sulfurique et l'essence de térébenthine, pris à l'état d'une pureté parfaite.

L'appareil était semblable au précédent.

Afin de mettre les physiciens en état de comparer ces expériences avec d'autres qui pourraient être faites sur le même sujet, je caractériserai chacun des liquides, en indiquant ses propriétés principales.

	Températures d'ébullition.	Densité.	Chaleurs spécifiques.
Alcool	78,8	0,793	0,622
Ether sulfurique	35,5	0,715	0,522
Essence	156,8	0,872	0,462

En répétant plusieurs fois, avec chacun de ces liquides, l'expérience décrite ci-dessus, j'ai obtenu les résultats rapportés dans le tableau suivant :

Tableau des résultats.

	Chaleurs totales.	Chaleurs latentes.	Chaleurs totales en eau.	Chaleurs latentes en eau.	Densités des vapeurs prises à zéro.	Densités aux points d'ébullition.
Eau	631	531	631	531	0,623	0,451
Alcool	410,7	331,9	255,5	207,7	1,613	1,238
Ether sulfuriq.	210	174,5	109,3	90,8	2,586	2,280
Essence	323	166,2	149,2	76,8	5,010	3,207

Les nombres des deux premières colonnes sont ceux qu'on obtiendrait en condensant chaque vapeur par du

liquide froid de même nature. Les deux autres colonnes représentent les mêmes résultats comparés à l'eau, dont la capacité est prise pour unité.

On voit, par l'inspection des troisième et quatrième colonnes, qu'un liquide parvenu au point où il va entrer en ébullition, exige d'autant moins de chaleur, pour se réduire en vapeur, que la densité de cette vapeur est plus grande, et même que les chaleurs latentes des diverses vapeurs sont sensiblement, en raison inverse de leurs densités, prises aux points d'ébullition des liquides correspondans, ou, en d'autres termes, que des volumes égaux des diverses vapeurs contiennent aux températures d'ébullition des liquides qui les produisent, des quantités égales de chaleur latente.

Des essais analogues faits sur le sulfure de carbone, dont la vapeur a une densité de 2,644, conduisent au même résultat. On sait aussi que l'iode, qui produit la plus pesante des vapeurs (8,61), demande une très-petite quantité de chaleur pour se volatiliser. Le soufre au contraire ne se réduit en vapeur que difficilement. Ce dernier fait vient encore à l'appui de la conséquence tirée des expériences précédentes, puisque la densité de la vapeur du soufre est à peu près égale à l'unité. Cette détermination n'a pas été prise directement; mais on peut la déduire de l'acide sulfureux ou de l'acide hydrosulfurique.

84. Une question importante et beaucoup agitée dans ces derniers temps, est celle-ci : la quantité de chaleur que renferme une vapeur est-elle variable ou constante aux différentes pressions? Cette question a d'autant plus d'importance qu'elle est liée à la théorie de la chaleur et à

celle des machines à vapeur. On peut regarder comme un fait suffisamment démontré par les expériences, que la variation de la quantité totale de chaleur est faible, de sorte que la même quantité de chaleur et conséquemment le même poids de combustible suffit pour élever un kilogramme de vapeur d'eau à un degré quelconque de force élastique.

D'après Southern, la chaleur latente serait constante et la quantité totale croîtrait de la quantité dont s'élève la température. Par exemple, si la quantité totale, sous la pression $0^m,76$ et à la température de 100 degrés, était 635, elle deviendrait 657 à la température 122 sous la pression $0^m,76 \times 2$, et ainsi de suite, etc. D'après les expériences de MM. Desormes et Clément, sur la vapeur d'eau; d'après mes propres expériences sur la vapeur d'eau et sur celles d'alcool, d'éther sulfurique et d'essence de térébenthine, la quantité totale de chaleur contenue dans une même vapeur serait invariable; l'élévation de pression et de température n'auraient aucune influence. Ainsi le nombre 635, obtenu sous la pression $0^m,76$ et à 100 degrés, serait encore le même à une pression et à une température quelconques.

Convaincu que les expériences des physiciens français cités plus haut, si elles sont suffisantes pour les applications des arts, ne peuvent nullement servir à établir une loi physique; et que, même le mode d'expérimenter de M. Southern, quoique plus susceptible de précision, n'est pas à l'abri du reproche, j'ai repris mon travail et j'ai fait de nouveau beaucoup d'expériences dans lesquelles la température a été portée jusqu'à 160°; mais la difficulté de faire tenir les appareils m'a toujours arrêté. Cependant je ne

peux plus admettre, d'après mes nouvelles expériences, que la chaleur totale de la vapeur soit constante. Mais je la regarde comme croissant avec la température, de telle manière que le nombre de degrés dont s'accroît la chaleur totale, serait moindre que celui dont s'accroît la température. Ces dernières expériences ont été le sujet de plusieurs discussions à la Société philomatique, il y a quelques années. Les pièces dans le calorimètre étaient tellement combinées, que le serpentin condenseur pouvait être enlevé à volonté; de sorte qu'on avait la possibilité de peser la vapeur volatilisée et la vapeur condensée, ce qui est un avantage. Au reste, il n'est pas étonnant que les différens physiciens ne s'accordent point sur ce sujet, puisqu'il existe peu d'accord sur la chaleur latente de la vapeur d'eau sous la pression $0^m,76$ dont la détermination ne présente aucune des difficultés attachées aux expériences faites à de hautes pressions.

Chaleur latente de la vapeur d'eau à la pression ordinaire:

Comte de Rumford, 567; M. Gay-Lussac, 550; MM. Clément et Desormes, 550; mes expériences, 1re série, 531; 2e série, 540.

(M. Delaplace, *Mécan. céleste*, liv. 12; M. Poisson, *An. ch. et phys.*, t. 23, ont considéré ce sujet sous un point de vue théorique. Voyez leurs mémoires.)

Du Froid par la fusion ou des mélanges réfrigérans.

85. L'expérience nous a appris que tous les corps solides, parvenus à la température de leur fusion, exigent, pour prendre l'état liquide, une quantité de chaleur considérable.

La fusion d'un corps ne peut s'opérer que par l'absor-

ption d'une quantité plus ou moins grande de chaleur. Si donc, par une cause quelconque, autre que l'action d'une source directe de chaleur, on détermine un corps à se fondre, il doit prendre aux corps qui l'environnent la chaleur nécessaire pour sa fusion, et conséquemment les refroidir.

Ainsi, qu'on mêle une partie de sel marin avec trois parties de neige, le tout deviendra liquide, et un thermomètre, plongé dans ce mélange, pourra s'abaisser jusqu'à 20° au-dessous de zéro.

Ici, l'affinité du sel marin pour l'eau détermine la fusion de la glace : l'effet observé est complexe; c'est la différence entre la chaleur absorbée par la fusion de la glace et du sel, et celle qui se dégage dans la combinaison. Quand ces deux quantités se compensent, la température du mélange ne change pas. Si la première quantité l'emporte sur la seconde, il y a production de froid; dans le cas contraire, il y a dégagement de chaleur.

En général, les corps solides qui ont perdu par la chaleur toute leur eau de cristallisation, et qui ont une grande tendance à se combiner avec l'eau, dégagent de la chaleur par leur mélange avec ce liquide. Tels sont la chaux, la potasse, le plâtre, calcinés; tandis que les acides, les oxides et les sels cristallisés produisent du froid dans la même circonstance. C'est le cas de la potasse, du sulfate de soude, du nitrate de chaux, etc., cristallisés.

Exemples de Mélanges réfrigérans.

1 Nitrate d'ammoniaque, 1 Eau,	de 10° à — 15°,6.

1 Sel marin, 3 Neige,	de 0° à — 20°.
3 Chlorure de calcium cristallisé, 2 Neige,	de — 26°,1 à — 55°,5.
3 Sulfate de soude cristallisé, 2 Acide nitrique étendu,	de + 10° à — 16°,11.
8 Neige, 10 Acide sulfurique faible,	de — 55° à — 68°,3.

Cet acide sulfurique faible a une composition particulière; c'est un mélange

de 8 d'acide sulfurique concentré,
de 4 d'eau et 8 d'alcool.

Ce tableau exige quelques développemens.

Le premier mélange produit du froid; ce froid est le résultat de la fusion du sel et de l'eau de cristallisation qu'il renferme, et qui peut être considérée comme de l'eau à l'état de glace.

Le second mélange est employé fréquemment dans les laboratoires; c'est à l'aide du même mélange que les limonadiers font leurs glaces; le troisième sert à la congélation du mercure.

La raison qui fait que les froids produits par ces mélanges sont limités, est que l'action chimique cesse de s'exercer au-delà de certaines limites de température. Par exemple, le sel et la neige ne produisent pas par leur mélange un froid supérieur à 20 degrés, parce qu'au-dessous de ce point le sel est sans action sur l'eau. Si l'on exposait à un froid de — 20 degrés, une dissolution de sel marin, il y aurait séparation de l'eau à l'état de glace, et du sel à l'état solide.

Le chlorure de calcium, au contraire, exerce sur l'eau une action puissante, même à de très-basses températures; c'est pourquoi, dans l'opération de la congélation du mercure, on refroidit préalablement le chlorure et la neige, en les enveloppant d'un mélange de sel et de glace à — 20 degrés.

Il y a encore une remarque à faire : elle est relative aux proportions. Il est absolument nécessaire pour obtenir les froids rapportés dans le tableau, d'observer les proportions qui y sont indiquées, parce que d'autres pourraient donner des résultats tout-à-fait différens. En effet, qu'on mélange d'abord 4 parties de glace avec 1 partie d'acide sulfurique concentré, on obtiendra du froid, tandis que le mélange inverse (1 partie de glace et 4 parties d'acide sulfurique) dégagera une quantité de chaleur assez considérable pour réduire en vapeur une partie de l'eau du mélange.

Du froid produit par l'Évaporation.

86. Nous avons vu précédemment que les liquides absorbent une quantité de chaleur considérable dans le moment de leur passage à l'état de vapeur. Si donc, par le vide, ou de toute autre manière, un liquide se volatilise, il doit enlever aux corps environnans, ou à lui-même, toute la chaleur qui lui est nécessaire dans son nouvel état. Il paraît que Cullen est le premier physicien qui ait eu des idées nettes sur la production du froid par l'évaporation; il a bien reconnu que le froid est plus grand dans le vide que dans l'air, parce que l'évaporation y est plus rapide; qu'il est aussi plus grand par un vent chaud et sec, que par un vent froid et humide; que les liquides produisent d'autant plus de froid, par l'évaporation, qu'ils sont

plus volatils. Il est même parvenu à congeler l'eau dans le vide, en plaçant un vase rempli d'éther nitreux dans un autre vase contenant de l'eau. (Cullen, *Essais*, etc.)

87. On doit à M. Leslie d'Edimbourg une fort belle expérience dans laquelle l'eau est congelée par le froid produit dans l'évaporation d'une portion de ce liquide lui-même. Afin de rendre l'évaporation plus rapide, on absorbe la vapeur d'eau par l'acide sulfurique concentré : sans la présence de cet acide, la cloche serait bientôt remplie de vapeur; l'évaporation s'arrêterait et conséquemment la production du froid. Voici la manière de disposer l'expérience : on place sous le récipient de la machine pneumatique un vase en cuivre très-mince qui a la forme d'une soucoupe; ce vase a trois pieds et repose sur un second vase en cristal, rempli, en partie, d'acide sulfurique concentré. Le poids de l'acide doit être d'une livre au moins; on ne met dans la soucoupe qu'une petite quantité d'eau, par exemple, 15 grammes. On fait le vide : l'évaporation a lieu avec une vitesse qui dépend de la température; comme la vapeur est condensée par l'acide, la volatilisation est continue. Bientôt l'eau restante est assez refroidie pour se congeler. La congélation de l'eau a encore lieu, quand on remplace l'acide par d'autres matières hygrométriques, telles que le plâtre calciné, la chaux vive, etc. On a formé ainsi plusieurs livres de glace; mais jusqu'à présent cette ingénieuse expérience n'a pas reçu d'application en grand.

La tendance à l'évaporation se maintient dans l'eau glacée jusqu'aux plus basses températures; aussi, quand on place dans l'eau une petite boule de verre remplie de mercure, et que le vide a été fait pendant quelque temps, trouve-t-on le métal congelé. L'expérience est encore plus

piquante, si on entoure d'avance la boule de mercure d'une certaine quantité de glace, et si on la suspend dans le récipient; on voit la couche diminuer d'épaisseur, et bientôt le mercure se solidifier. (*An. ch.*, t. 78.) On sait d'ailleurs, par une expérience ancienne, que la glace, à la surface de la terre, diminue par le vent d'une manière sensible, quoique le froid se maintienne au-dessous de zéro.

88. Le *maximum* de froid produit par l'évaporation dépend de la température des corps environnans : car, puisque la force élastique de la vapeur va sans cesse en diminuant, ainsi que sa vitesse, il doit y avoir un moment où la chaleur communiquée par les corps environnans, égale la chaleur absorbée par l'évaporation; alors le froid a atteint le *maximum*, et il est visible que ce *maximum* est d'autant plus considérable que la température des corps environnans est plus basse : en effet, il résulte d'une expérience de M. Gay-Lussac que la congélation du mercure a lieu avec facilité, si l'on a soin d'entourer le vase rempli d'acide sulfurique, et la boule thermométrique, d'un mélange de glace et de sel.

89. Nous placerons ici les résultats de plusieurs expériences faites par M. Gay-Lussac sur le froid produit dans l'évaporation à l'air libre.

Le phénomène est ici un peu plus compliqué : d'abord l'évaporation est retardée par la pression de l'air, puisqu'elle est sensiblement nulle dans un air parfaitement calme; ensuite le froid est nécessairement moindre que dans le vide; et, pour une température initiale donnée, il est à son *maximum*, quand la chaleur absorbée par l'évaporation

est égale à celle que reçoit la surface du corps, et du contact de l'air et du rayonnement des corps environnans.

Pour déterminer le froid correspondant à une température donnée, M. Gay-Lussac fait arriver un courant d'air sec sur un thermomètre recouvert d'un tissu de batiste humide. L'air sort d'un gazomètre à pression constante : il se dessèche par son passage dans un tube rempli de chlorure de calcium, et arrive dans un second tube où sa température est donnée par un thermomètre sensible; il vient enfin frapper le thermomètre à surface humide.

Tableau des résultats.

Température de l'air sec à la pression de 0m,76.	Abaissement de température produit par l'évaporation au dessous de la température de l'air.	
0°	5,82	
1	6,09	
2	6,37	
3	6,66	
4	6,96	
5	7,27	
6	7,59	
7	7,92	
8	8,26	
9	8,61	
10	8,97	
11	9,37	21 — 13,12
12	9,70	22 — 13,51
13	10,07	23 — 13,90
14	10,44	24 — 14,30
15	10,82	25 — 14,70
16	11,20	
17	11,58	
18	11,96	
19	12,34	
20	12,73	

Le froid produit dans l'air, toutes choses égales d'ailleurs, doit être d'autant plus grand que la densité de l'air est moindre, ce qui en effet est conforme à l'expérience.

Sous une pression $0^m,65$, la température de l'air étant de $12^\circ,5$, le froid produit par l'évaporation a été de $10^\circ,5$; dans une autre expérience, la température de l'air étant la même, la pression étant de $0^m,50$, le froid a été de $12^\circ,0$.

Tout ce qui précède est relatif à l'air complètement desséché, de sorte que dans la nature, le froid est toujours moindre pour une température donnée, que le froid indiqué par la table; car, dans les temps les plus secs, l'air contient en général au moins les deux cinquièmes de l'humidité qu'il a dans l'état de saturation.

Des Vapeurs.

90. Nous n'avons à considérer les vapeurs que sous le rapport de leurs forces élastiques, de leurs densités, et enfin sous le rapport de leur mélange avec les gaz, puisque déjà il a été question de leur dilatation et de leur chaleur latente dans les chapitres précédens.

Forces élastiques.

91. La force de ressort des vapeurs est rendue manifeste dans une foule d'expériences; c'est cette force qui détermine le jeu des machines à vapeur, et qui produit un grand nombre de phénomènes importans que nous exposerons dans cet ouvrage.

Voulez-vous démontrer d'une manière expérimentale qu'une vapeur quelconque, que la vapeur d'éther, par exemple, possède, à la température ordinaire, une force élastique capable de soutenir une assez forte pression? remplissez presque complètement de mercure un tube ba-

rométrique, achevez de le remplir avec un centimètre environ d'éther sulfurique et renversez-le, en tenant le doigt sur la partie ouverte, jusqu'à ce que vous l'ayez plongée dans un bain de mercure. Alors ôtez le doigt, et vous verrez le mercure se tenir dans le tube à plus de vingt centimètres au-dessous du niveau auquel il se tiendrait si vous n'y aviez pas introduit d'éther. L'abaissement au-dessous du niveau du baromètre dans ce tube ne peut être attribué qu'à la force élastique de la vapeur qui presse sur la surface du métal, et l'empêche ainsi de monter à la hauteur qu'il atteint dans le baromètre en vertu du poids de l'atmosphère.

92. Pour obtenir la force élastique d'une vapeur au-dessous du point d'ébullition, on porte, comme l'a fait le premier M. Dalton en 1805 (*Manchester's mem.*, vol. 5), le tube dont il vient d'être question (*fig.* 81) à différentes températures, et l'on note à chaque fois la hauteur du mercure dans le baromètre et dans le tube renfermant le liquide. La différence est évidemment la valeur de la force élastique de la vapeur. Afin de donner au liquide qui fournit la vapeur une température déterminée, on entoure les deux tubes d'un autre tube plus large plein d'eau très-limpide, et dont la température est fournie par un thermomètre sensible à long réservoir; il est même bon, pour que l'expérience soit exacte, que le réservoir du thermomètre occupe toute l'étendue du tube rempli de vapeur. Il y a encore une remarque à faire, c'est que la différence des deux colonnes de mercure n'est réellement la valeur de la force élastique de la vapeur, qu'autant que par le calcul on a ramené chaque colonne à zéro, comme il sera indiqué à l'article du baromètre.

En faisant cette expérience avec les divers liquides, on reconnaît que tous, à la température de leur ébullition, font baisser le mercure dans le tube jusqu'au niveau du bain dans lequel il est plongé. A cette température, chaque liquide donne donc une vapeur dont la tension peut faire équilibre à la pression atmosphérique ou à $0^m,76$ de mercure environ.

93. Il est encore une autre manière de déterminer les forces élastiques des vapeurs au-dessous du point d'ébullition. Ce procédé est fondé sur ce qu'un liquide en ébullition produit une vapeur dont l'élasticité égale la pression à laquelle il est soumis. On établit la communication entre la cornue qui contient le liquide, et une machine pneumatique; un vase intermédiaire renferme un baromètre qui fait connaître l'élasticité de la vapeur au moment de l'ébullition : un réfrigérant convenablement disposé, condensant la vapeur à mesure qu'elle tend à s'échapper de la cornue, empêche le liquide de s'épuiser par l'ébullition, et permet de donner à l'expérience telle durée que l'on désire; on peut d'ailleurs déterminer l'ébullition à une pression quelconque. La figure 82 représente cet appareil. *A* est la cornue, *C* le réfrigérant, *B* le vase intermédiaire, et *K* le tuyau qui établit la communication entre tout l'appareil et la machine pneumatique.

Les deux procédés ont été employés par M. Dalton dans son grand travail sur les vapeurs et les gaz. M. Dulong a employé le second avec la modification du tuyau condenseur. Je m'en suis également servi pour mes expériences sur la loi des forces élastiques des vapeurs.

94. M. Gay-Lussac a proposé un moyen fort simple pour

avoir l'élasticité d'une vapeur à zéro et au-dessous; ce moyen consiste à courber le tube barométrique, et à plonger l'extrémité courbe dans un bain de glace ou de mélange réfrigérant (*fig.* 83).

95. Il ne nous reste plus qu'à chercher les forces élastiques des vapeurs au-dessus de la pression moyenne de l'atmosphère.

M. Dalton s'est d'abord servi d'un tube de baromètre recourbé en forme de siphon, dont la partie la plus courte est fermée (*fig.* 84). Il remplit ce tube de mercure à la manière ordinaire, et, après avoir fait sortir un centimètre environ de mercure, il le remplace par le liquide dont il veut examiner la vapeur : puis il incline ce tube en le tenant bien bouché avec le doigt. Le liquide, en vertu de sa légèreté, montant toujours dans la partie la plus élevée, on conçoit très-bien la possibilité de le faire parvenir à l'extrémité de la petite branche. M. Dalton ôte alors une partie du mercure; il note la hauteur de ce métal dans les deux branches, et il porte le liquide à diverses températures en plaçant la petite branche dans un cylindre métallique rempli d'eau ou d'huile plus ou moins chaude; il est visible que la force élastique de la vapeur soutient la pression extérieure, plus l'excès du niveau dans la longue branche. L'opacité du cylindre métallique s'oppose à ce qu'on prenne directement la hauteur du mercure dans la plus petite branche, mais on l'obtient en doublant la colonne de mercure qui s'est élevée pendant l'opération au-dessus du niveau primitif dans la plus longue, le mercure ayant baissé dans l'autre d'une égale quantité; cette correction suppose le diamètre le même dans les deux branches, ce qui n'est que rarement vrai dans la pratique. On

verse d'ailleurs du mercure dans la plus grande branche à mesure qu'on élève la température pour obtenir des forces élastiques plus grandes. M. le docteur Ure de Glascow a fait à ce procédé une légère modification; il introduit la partie fermée dans un ballon (*fig.* 85) et il porte ensuite le liquide du ballon à différentes températures.

Il est un autre procédé que nous regardons comme plus exact et plus commode. Il consiste à faire bouillir le liquide sous une pression élevée; l'appareil est (*fig.* 86) semblable à celui qui a été employé (*fig.* 82) pour déterminer les forces élastiques au-dessous du point d'ébullition. Seulement le tube *K* va plonger dans une colonne de mercure, et le baromètre est remplacé par un tube ouvert à ses deux extrémités. La force élastique de la vapeur ayant à vaincre le ressort de l'air intérieur, plus le poids de la colonne *m n* de mercure, pourra être plus ou moins augmentée, selon que cette dernière sera plus ou moins considérable. La force élastique de la vapeur a pour mesure la hauteur du baromètre au moment de l'expérience, plus celle du mercure dans le tube *t h* du vase intermédiaire.

Nous avons employé cet appareil dans nos expériences sur la recherche des quantités de chaleur de la vapeur à diverses pressions.

96. Il serait à désirer qu'on possédât une table très-exacte des forces élastiques des vapeurs, pour l'intervalle de la température de la glace à celle de 200 degrés : cette table exigerait des expériences très-soignées, et ces sortes d'expériences sont dangereuses aux températures élevées. Quoi qu'il en soit, voici celle qui a été calculée en partie par M. Biot d'après les résultats du mémoire de M. Dalton. J'y ai joint les forces élastiques pour des tempé-

ratures élevées que M. Dulong a bien voulu me confier et qu'il a obtenues en discutant les différentes expériences connues sur ce sujet. Cette table, que le gouvernement a demandée à l'Académie, n'est que provisoire; la commission dont M. Dulong est le rapporteur s'occupe à déterminer, avec une grande exactitude, les forces élastiques de la vapeur d'eau pour des pressions très-élevées.

Table des forces élastiques de la vapeur d'eau entre — 20 *et* + 100 *degrés.*

DEGRÉS	TENSION.	DEGRÉS	TENSION.	DEGRÉS	TENSION.	DEGRÉS	TENSION.
—20	1,333	18	15,353	56	119,39	94	611,18
—19	1,429	19	16,288	57	125,31	95	634,27
—18	1,531	20	17,314	58	131,50	96	658,05
—17	1,638	21	18,317	59	137,94	97	682,59
—16	1,755	22	19,417	60	144,66	98	707,63
—15	1,879	23	20,577	61	151,70	99	733,46
—14	2,011	24	21,805	62	158,96	100	760,00
—13	2,152	25	23,090	63	166,56		
—12	2,302	26	24,452	64	174,47		
—11	2,461	27	25,881	65	182,71		
—10	2,631	28	27,390	66	191,27		
— 9	2,812	29	29,045	67	200,18		
— 8	3,005	30	30,643	68	209,44		
— 7	3,210	31	32,410	69	219,06		
— 6	3,428	32	34,261	70	229,07		
— 5	3,660	33	36,188	71	239,45		
— 4	3,907	34	38,254	72	250,23		
— 3	4,170	35	40,404	73	261,43		
— 2	4,448	36	42,743	74	273,03		
— 1	4,745	37	45,038	75	285,07		
0	5,059	38	47,579	76	297,57		
1	5,393	39	50,147	77	310,49		
2	5,748	40	52,998	78	323,89		
3	6,123	41	55,772	79	337,76		
4	6,523	42	58,792	80	352,08		
5	6,747	43	61,958	81	367,00		
6	7,396	44	65,627	82	382,38		
7	7,871	45	68,751	83	398,28		
8	8,375	46	72,393	84	414,73		
9	8,909	47	76,205	85	431,71		
10	9,475	48	80,195	86	449,26		
11	10,074	49	84,370	87	467,38		
12	10,707	50	88,742	88	486,09		
13	11,378	51	93,301	89	505,38		
14	12,087	52	98,075	90	525,28		
15	12,837	53	103,06	91	545,80		
16	13,630	54	108,27	92	566,95		
17	14,468	55	113,71	93	588,74		

Table des forces élastiques de la vapeur d'eau, depuis $0^m,76$ *jusqu'à huit pressions.*

Nombre d'atmosphères.	Pression en mètres de mercure.	Température.
1	0,76	100
1 $\frac{1}{2}$	1,140	112,2
2	1,52	122
2 $\frac{1}{2}$	1,90	129
3	2,28	135
3 $\frac{1}{2}$	2,66	140,7
4	3,04	145,2
4 $\frac{1}{2}$	3,42	150
5	3,80	154
5 $\frac{1}{2}$	4,18	158
6	4,56	161,5
6 $\frac{1}{2}$	4,94	164,7
7	5,32	168
7 $\frac{1}{2}$	5,70	170,3
8	6,08	173

(*Voyez* les additions.)

97. On avait admis en France que les forces élastiques de toutes les vapeurs sont les mêmes à égale distance des points d'ébullition des liquides qui les produisent. Ainsi, si la vapeur aqueuse à la température de 100 degrés, terme de l'ébullition de l'eau, est capable de faire équilibre à une pression de $0^m,76$, elle perdrait la moitié de sa force par une diminution de 18°, et acquerrait une force double par un accroissement de température égal à 22°,2. Toute autre vapeur éprouverait le même changement dans son ressort pour un égal intervalle de température.

D'après cette loi, il suffirait d'avoir la table d'une seule vapeur faite avec précision, pour qu'on pût en déduire toutes les forces élastiques des autres vapeurs à une température quelconque. Par exemple, l'eau à 100° — 18°,

l'alcool à 78°,7 — 18°, l'éther sulfurique à 35°,5 — 18°, l'essence de térébenthine à 156°,8 — 18°, auraient une force élastique égale à 0^m,38, moitié de 0^m,76.

Les mêmes liquides à 22°, au-dessus de la température de leur ébullition, auraient une force égale à 1^m,52 ou deux fois 0^m,76.

Voudrait-on connaître la force élastique de l'éther sulfurique à 18°,5, de l'alcool à 55°,4? on retrancherait d'abord 18°,5 de 35°,5, température de l'ébullition de l'éther, on aurait 17 pour différence. On prendrait dans la table l'élasticité de la vapeur d'eau à 100° — 17° = 83°; on trouverait 0^m,398. Ce serait là la force élastique de la vapeur de l'éther à 18°5. L'alcool à 55°,4 se trouve distant de son ébullition de 23°,3; on chercherait dans la table l'élasticité de la vapeur d'eau à 100°—23°3=76°, 7. On aurait 0^m,306 pour la force élastique de la vapeur d'alcool à 55°,4.

Cette loi n'a pas toute la rigueur qu'on lui avait attribuée; je citerai mes expériences desquelles il résulte que l'eau, l'alcool, l'éther sulfurique, et l'essence de térébenthine entrent en ébullition sous des pressions égales, à des températures non équidistantes de leurs points d'ébullition sous 0^m,76. Il est évident d'après cela qu'à des distances égales de ces derniers points, la force élastique de chacun de ces liquides n'est pas la même.

Pour un intervalle d'une demi-pression, la différence présentée par l'éther sulfurique est d'un degré; l'essence de térébenthine en présente une de 7 degrés. J'ai pris directement la température d'ébullition de la liqueur des Hollandais; je l'ai trouvée de 85°,85. Ce même liquide à 12°,17 a une force élastique égale à 0^m,0558. Si l'on cherche dans la table de la vapeur d'eau la température à

laquelle elle a cette force élastique, on trouve que c'est à 40°,95. Cette température est à 59°,05 du point de l'ébullition de l'eau; en ajoutant 59°,05 à 12°,17, on devrait avoir 85°,85 si la loi était conforme à l'expérience, et l'on n'a que 71°,22; c'est-à-dire que la différence est de 14°,63. (*Ann. ch. et phys.*, 1822.)

Le docteur Ure a été conduit à la même conséquence; cependant nous pensons que ses expériences seules ne pouvaient infirmer la loi de Dalton, puisque les liquides dont il s'est servi n'étaient pas parfaitement homogènes.

98. Quoiqu'il soit démontré que la loi de M. Dalton sur les forces élastiques des vapeurs n'est pas rigoureusement exacte, ce célèbre physicien n'en a pas moins rendu un service éminent en la faisant connaître, parce que les différences que présentent les résultats déduits de cette loi et ceux que fournit l'expérience ne sont pas très-considérables. Ainsi, d'après cette loi, l'acide sulfurique, le mercure et les métaux volatils à de hautes températures n'ont, à la température ordinaire, qu'une élasticité inappréciable, ce qui est en effet conforme à l'observation. On a donc la certitude que la colonne de mercure dans le baromètre n'est nullement déprimée par la vapeur de ce métal.

99. La présence d'une matière étrangère influe sur le degré de volatilité d'un liquide; ainsi l'eau de mer ne bout qu'à cent et quelques degrés; la potasse, le chlorure de calcium, l'acide phosphorique, etc., peuvent retarder le point d'ébullition de l'eau de plus de vingt degrés. Jamais une eau qui coule à la surface de la terre ne bout à 100 degrés, parce qu'elle renferme toujours quelques sels qui augmentent sa fixité.

Les nombres que nous avons donnés plus haut pour les températures des points d'ébullition de plusieurs liquides, tels que l'eau, l'alcool, l'éther sulfurique et l'essence de térébenthine, ne sont exacts qu'autant que ces liquides sont dans le plus grand état de pureté.

L'alcool du commerce, qui est toujours mélangé avec plus ou moins d'eau, ne bout qu'à 80 et quelques degrés; l'éther sulfurique ordinaire renferme de l'eau et de l'alcool; aussi n'entre-t-il en ébullition qu'au-delà de 40 degrés.

100. Avant de quitter le sujet des forces élastiques, je citerai une remarque fort ingénieuse du R. P. Wollaston, frère du célèbre chimiste de ce nom : d'après plusieurs expériences faites à Londres, il a reconnu qu'un degré de variation dans la température de l'ébullition de l'eau pure correspond à $0^m,027$ de variation dans la hauteur du baromètre; il en résulte qu'un thermomètre sensible placé dans un vase rempli d'eau, qu'on transporterait au bas et au sommet d'un lieu élevé, pourrait faire connaître la hauteur du baromètre, si on le portait successivement à ces deux stations, et par conséquent servir à la mesure de l'élévation. Il ne nous paraît pas probable qu'on préfère cette méthode à celle par laquelle on prend directement les hauteurs du baromètre. Cette dernière sera exposée dans les additions placées à la fin de l'ouvrage.

Densités des Vapeurs.

101. Ce n'est que depuis un petit nombre d'années qu'on connaît avec exactitude les densités de quelques vapeurs, à la pression moyenne de l'atmosphère. On doit à M. Gay-Lussac le procédé par lequel on les dé-

termine. Ce procédé, considéré d'une manière générale, consiste à mesurer le volume de vapeur fourni par un poids donné de liquide. Pour qu'il soit bien conçu, il est nécessaire d'entrer dans les détails de l'expérience. On commence par peser une ampoule de verre d'abord vide et ensuite pleine de liquide; on la remplit en chauffant la boule et plongeant la pointe ouverte dans le liquide : bientôt l'air se refroidit et permet au liquide, pressé par l'atmosphère, d'entrer dans la boule; on répète l'opération jusqu'à ce que la boule soit complètement remplie, sans mélange d'air; on chauffe alors légèrement l'ampoule pour chasser un peu de liquide, et l'on scelle en même temps l'extrémité du tube à la lampe des émailleurs ou à une bougie.

On introduit ensuite cette ampoule dans une cloche graduée (*fig.* 87). Cette cloche a un pied environ de longueur et deux pouces de diamètre : elle est remplie de mercure, et plonge par sa base dans une chaudière en fonte, pleine du même métal. Elle est entourée d'un manchon de verre, rempli d'eau et ouvert par ses deux extrémités; la chaudière est placée sur un foyer, de sorte qu'on peut élever la température de tout l'appareil. Bientôt la petite ampoule crève, et l'eau qui y était contenue se réduit en vapeur; on continue de chauffer jusqu'à faire bouillir l'eau du manchon(1). A ce moment, on prend le volume occupé par la vapeur; on note la hauteur du mercure dans la cloche au-dessus du niveau du bain; en la retranchant de la hauteur du baromètre placé dans le lieu des expériences, on a la pression de la vapeur inté-

(1) Pour des liquides moins volatiles que l'eau on remplirait le manchon d'une huile fixe.

rieure. Il est sous-entendu qu'il faut que chaque colonne de mercure soit ramenée par le calcul à la température de la glace fondante. On doit aussi ajouter à la hauteur du baromètre la valeur de la petite colonne de liquide du manchon qui pèse sur le bain de mercure.

On s'assurera si tout le liquide est réduit en vapeur; car, s'il ne l'était pas, on commettrait de grandes erreurs. Cela arriverait nécessairement, si l'on introduisait plus de liquide qu'il n'en faut pour remplir toute la cloche à la température de l'expérience. Il y a un moyen certain de savoir si cette circonstance a lieu; par la loi de Dalton, on peut, comme nous l'avons indiqué (n° 97), déterminer d'une manière approximative la force élastique d'une vapeur à une température donnée. Si la force élastique de la vapeur de la cloche, mesurée par le moyen pratiqué au commencement de ce chapitre, est égale à cette limite, on pourra craindre que tout le liquide n'ait pas été réduit en vapeur; on devra recommencer l'expérience sur de plus petites quantités de liquide, jusqu'à ce que la force de la vapeur, prise au moment de la mesure du volume, soit au-dessous de la limite assignée par la loi approximative des forces élastiques. Évidemment il faudra toujours que la température de l'appareil soit au moins égale à la température de l'ébullition du liquide de la vapeur duquel on cherche la densité.

Pour faire le calcul, on rapportera le volume d'un gramme de vapeur à celui d'un gramme d'air sec, à $0^{m},76$ de pression, et à la température de la glace fondante. Or, puisque 1 litre d'air atmosphérique pèse $1^{gr},299$, le volume d'un gramme doit être $\frac{1 \text{ lit.}}{1,299}$. Soit V le volume de

vapeur fourni par un poids p de liquide, le volume d'un gramme sera $\frac{V}{p}$; soit h la hauteur de la colonne de mercure, élevée dans la cloche au-dessus du niveau du bain, H la hauteur du baromètre extérieur; $H - h$ sera la pression supportée par la vapeur. Pour que la comparaison des volumes d'une même quantité de matière soit permise, ils seront ramenés par le calcul à une même température et à une même pression. On choisit la pression $0^m,76$ et la température de la glace fondante. Le volume V est trop petit, puisque chaque division, par suite de la dilatation, s'est agrandie dans le rapport de 1 à $1 + k\,t$, k étant le coëfficient de la dilatation cubique de la matière de la cloche; le volume de la vapeur est dilaté dans le rapport de 1 à $1 + 0,00375 \times t$; nous savons aussi que les volumes des gaz et des vapeurs sont en raison inverse des pressions; nous aurons donc pour le volume corrigé (1) :

$$\frac{V\,(1 + k\,t)\,(H - h.)}{p(1 + 0,00375 \times t)0,76} \quad (a).$$

102. *Exemple.* Densité de la vapeur d'eau d'après les données des expériences de M. Gay-Lussac :

Poids de l'ampoule pleine d'eau.	$1^g,391$
Poids de l'ampoule vide.	$0^g,791$
Poids de l'eau par soustraction.	$0^g,600$

Cette quantité d'eau a rempli, à la température de 100 degrés, 220 divisions de la cloche; chaque division valait $0^{litre},005$; la colonne de mercure élevée dans la cloche au-dessus du niveau du bain était de $0^m,052$; le baromètre extérieur marquait $0^m,756$; le coëfficient de la dilatation

(1) Dans H est comprise la hauteur de la colonne d'eau du manchon, multipliée par le rapport de la densité de ce liquide à celle du mercure.

cubique du verre est pour chaque degré centigrade, de 0 à 100°, $\frac{1}{38700}$.

En mettant toutes ces données dans la formule, on trouve qu'un gramme de vapeur occupe $1^{\text{litre}},238$, à la température de la glace fondante, et à la pression $0^{m},76$; dans les mêmes circonstances un gramme d'air peut occuper $\frac{1 \text{ litre}}{1,299}$; et puisque les densités sont évidemment en raison inverse des volumes sous le même poids, on trouve que la densité de la vapeur est 0,622, ou sensiblement les $\frac{10}{16}$ de celle de l'air. De la même manière, M. Gay-Lussac a trouvé les densités des vapeurs d'éther, d'alcool, de sulfure de carbone et d'essence de térébenthine. Elles sont rapportées dans le tableau ci-joint :

Tableau des densités.		Poids d'un litre à zéro et $0^{m},76$ de pression.
Air	1,000	1g,299
Vapeur d'eau	0,622	0,810
d'alcool	1,613	2,096
d'éther sulfurique	2,586	3,360
de sulfure de carbone	2,645	3,436
d'essence de térébenthine	5,013	6,515

103. Ce sont là les seules vapeurs dont la densité ait été déterminée directement. La connaissance de la densité d'une vapeur est souvent un moyen de vérification d'une analyse chimique; par exemple l'analyse a montré que l'eau est formée de 1 d'hydrogène et de $\frac{1}{2}$ d'oxygène. Pour vérifier ce résultat, qu'on ajoute le poids d'un volume d'hydrogène au poids d'un demi-volume d'oxygène, cette somme devra être sensiblement égale à la densité 0,622 trouvée directement; en effet on obtient ainsi 0,620. On pourrait faire une vérification analogue pour l'alcool, l'éther, et en gé-

néral, pour tous les liquides dont la vapeur a une densité et une composition chimique connues.

104. De Saussure avait pensé que les vapeurs étaient d'autant plus lourdes, que le liquide qui leur donnait naissance était plus volatil. Les expériences rapportées ci-dessus prouvent qu'il n'en est pas ainsi, puisque le sulfure de carbone, moins volatil que l'éther sulfurique, donne une vapeur plus dense que celle qui est fournie par ce dernier liquide.

105. Il était utile de rechercher si les densités des vapeurs sont proportionnelles aux pressions qu'elles supportent : c'est ce que j'ai fait dans un mémoire (*An. de ch. et de phys.*, 1822), pour l'intervalle de 0 à 80 degrés. Le procédé de M. Gay-Lussac donne les densités des vapeurs sous la pression 0^m76. Le procédé dont j'ai fait usage les fait connaître aux pressions inférieures. Pour obtenir de la vapeur parfaitement isolée, et à la température des corps environnans, on a un large baromètre à robinet, dont le diamètre est triple de celui des baromètres ordinaires (*fig.* 88), et dans la partie supérieure duquel on introduit le liquide qu'on veut soumettre à l'expérience; on y adapte un ballon parfaitement vide d'air : il est bientôt rempli de vapeur. Un baromètre ordinaire *B* plonge dans le même bain de mercure, de sorte qu'on connaît la force élastique par la différence des hauteurs du mercure dans les deux tubes; enfin, par l'inspection d'un troisième tube de baromètre *C*, renfermant le même liquide, on juge si la force élastique est au maximum, et conséquemment si l'espace est saturé. Le ballon qui a été employé pour les expériences avait une capacité de $9^{\text{litres}},3746$ à la température de 15 degrés.

L'eau, l'éther sulfurique et le sulfure de carbone ont été l'objet de ces recherches; on ne rapportera que quelques résultats fournis par le sulfure de carbone.

Ire EXPÉRIENCE. Température de l'air = 15°,87.

Poids du ballon vide. 874g,975

Poids du ballon plein de vapeur. 883g,162

Poids de la vapeur. 8g,187

Force élastique. 0m,1991

En ramenant le poids de la vapeur à zéro, on trouve 8g,648.

Le poids du même volume de vapeur fournie par le liquide en ébullition sous 0m,76, et ramené à 0°, serait de 32g,249.

IIe EXPÉRIENCE. Température de l'air = 14°,78.

Poids du ballon vide. 875g,018

Poids du ballon plein. 880g,212

Poids de la vapeur. 5g,194

Poids ramené à zéro. 5g,486

Force élastique. 0m,1272

Les poids 32,249, 8,648, 5,486, sont proportionnels aux forces élastiques 0m,76, 0m,199 et 0m,127.

De ces expériences et d'autres analogues il résulte que les vapeurs, ramenées par le calcul à une même température, sont proportionnelles aux forces élastiques. M. Southern a fait sur la vapeur d'eau, dans une échelle assez étendue, des expériences qui lui ont fait admettre la proportionnalité des densités aux élasticités, sans la correction de la température. Cette opinion me paraît erronée. Les résultats des expériences, que je viens de rapporter sur l'extension de la loi de Mariotte aux vapeurs, ne doivent être considérés comme vrais que dans certaines limites.

166. M. Cagniard de la Tour a cherché les effets produits sur plusieurs liquides par l'action réunie de la chaleur et de la compression. Il renferme dans des tubes de verre scellés à la lampe, successivement de l'eau, de l'alcool, de l'éther sulfurique, en quantité suffisante seulement pour remplir une partie de leur capacité. Les tubes sont chauffés avec précaution. Le liquide intérieur se dilate d'abord; et, au-delà d'une certaine limite d'expansion où il est loin de remplir toute la capacité du tube, il se réduit en vapeur, sans laisser la plus petite apparence de liquide. En faisant agir les vapeurs par pression sur un volume d'air constant, M. Cagniard a pu connaître la force élastique. L'appareil qu'il a employé est formé (*fig.* 89) d'un tube *ABC*, ayant un millimètre de diamètre dans toute sa longueur, et d'un second tube *F D E* soudé au premier, du diamètre de 45 millimètres; le mercure occupe l'espace *B C D*, et le liquide l'espace *FE*; le tube étroit *A B C* est rempli d'air, et fait fonction de manomètre.

Voici les résultats auxquels M. Cagniard est arrivé : l'éther sulfurique se réduit en vapeur à la température de 200 degrés, dans un espace moindre que le double de son volume à l'état liquide; il exerce alors une pression de 37 à 38 atmosphères. Porté à la température de 259 degrés, l'alcool se vaporise aussi totalement dans un espace un peu moindre que trois fois son volume à l'état liquide; il fait équilibre à 119 atmosphères. Enfin l'eau, à une température peu différente de celle de la fusion du zinc, prend l'état de fluide élastique dans un espace à peu près quadruple de son volume à l'état liquide.

Pour déterminer le degré de chaleur de l'alcool et de

l'éther, M. Cagniard de la Tour fait chauffer dans un bain d'huile les tubes qui les renferment.

Ce procédé n'est certainement pas susceptible d'une grande exactitude, mais les résultats généraux n'en présentent pas moins beaucoup d'intérêt. (*Ann. de ch. et de phys.*, t. 21 et 22.)

On peut tirer de ce qui précède cette conséquence : que les vapeurs suivent, dans certaines limites, la loi de la condensation des gaz, et qu'au-delà elles s'en écartent considérablement. Au reste, nous verrons que les gaz *permanens*, soumis à de fortes compressions, ne suivent plus la loi de la proportionnalité des densités aux forces élastiques, ou, en d'autres termes, s'écartent de la loi de Mariotte, (108).

Mélange des Gaz et des Vapeurs.

107. Pour bien comprendre l'histoire des phénomènes produits par le mélange des gaz et des vapeurs, il faut d'abord connaître la loi de la condensation des gaz, la différence qui existe entre les gaz et les vapeurs, enfin le mélange des gaz entre eux.

108. La variation du volume d'une même masse de gaz, correspondant à une variation de pression, suit une loi que Boyle et Mariotte ont découverte. Elle consiste en ce qu'une même masse de gaz occupe des *volumes* qui sont en *raison inverse des pressions* auxquelles elle est soumise. Pour démontrer cette loi d'une manière expérimentale, on prend un tube de verre recourbé (*fig.* 90) du diamètre de ceux qui sont employés pour les baromètres; il faut que la branche la plus courte ait le même diamètre intérieur dans toute sa longueur. La longueur ordi-

naire de cette branche est de 6 à 8 pouces; celle de la plus grande branche doit être de 6 à 9 pieds. Le tout est fixé sur une planche, qui porte une division adaptée aux deux tubes. On introduit, par la partie ouverte *A*, une petite quantité de mercure, de manière que le niveau soit établi dans les deux branches; le volume de l'air de la plus petite branche est ainsi bien connu. Il soutient la pression extérieure : si maintenant l'on verse, par la plus grande branche, du mercure de manière que le niveau de ce métal dans la longue branche surpasse celui de la plus courte d'une quantité égale à la pression extérieure, le volume d'air sera réduit à moitié. Si cette différence, par l'addition d'une nouvelle quantité de mercure, est égale à deux fois la pression extérieure, auquel cas le gaz de la petite branche soutient trois pressions, son volume sera réduit au tiers, et ainsi de suite. Il faut remarquer que l'air est complètement desséché; que la température ne change pas pendant l'expérience. Le petit tableau ci-joint met la loi sous les yeux du lecteur :

Pression.	Volume de l'air.
$0^m,76$	100 parties.
$0,76 \times 2$	50
$0,76 \times 3$	33,3
$0,76 \times 4$	25

On a souvent occasion de recourir à cette loi pour ramener un volume donné d'air à une pression constante. Rien n'est plus facile : par exemple, 150 parties d'air sont à la pression $0^m,74$; on demande le volume à la pression moyenne $0^m,76$. On fera la proportion $150 : x :: 0,76 : 0,74$ d'où $x = \frac{150 \times 0,74}{0,76} = 146$ parties.

109. La loi de Mariotte est vraie dans des limites étendues,

par exemple, de 0 à dix atmosphères. Mais d'après les expériences faites en Angleterre on doit nécessairement admettre que le volume calculé serait au-dessus du volume observé à de fortes pressions. M. Faraday est parvenu à rendre liquides, par des pressions élevées, un assez grand nombre de gaz, qu'on supposait suivre la loi de Mariotte, tels que l'acide sulfureux, les acides hydrosulfurique et carbonique, l'oxide de chlore, l'ammoniaque, le protoxide d'azote et le cyanogène. Tous les liquides produits par la condensation de ces gaz sont incolores, à l'exception de celui que fournit l'oxide de chlore, et tous sont parfaitement fluides et volatils, et en général ne se solidifient pas par le froid. La première expérience fut faite sur les cristaux de chlore. On sait qu'une dissolution de ce gaz, abandonnée à une température inférieure à 4°,5, laisse déposer des cristaux qui, d'après les expériences de M. H. Davy, sont formés par une combinaison de chlore et d'eau, et M. Faraday a reconnu récemment que le rapport de l'eau au chlore est 72,30 à 27,7. L'illustre savant à qui la chimie doit de si belles conceptions, suggéra à M. Faraday l'idée de soumettre ces cristaux à l'action réunie de la chaleur et de la pression. Des cristaux de chlore, desséchés autant que possible, furent introduits dans un tube de verre, qui avait été scellé hermétiquement. A la température de 38°, ils se décomposèrent et donnèrent naissance à deux liquides, dont l'un de couleur jaune pâle offrait l'aspect de l'eau, l'autre d'une couleur jaune verdâtre, ressemblait au chlorure d'azote; mais on peut le regarder comme du *chlore pur liquéfié*, puisque du gaz chlore, desséché et exposé à une forte compression, a donné le même liquide.

Le chlore liquide peut être séparé de l'eau par la distil-

au moyen de la lampe à esprit de vin. Il est parfaitement limpide et fluide à 18 degrés au-dessous de zéro. Exposé à la pression ordinaire de l'atmosphère, il se volatilise, mais en partie seulement, à cause du froid produit par son évaporation (n° 86.)

Tableau des principaux Gaz liquéfiés.

Acide sulfureux liquide (dté 1,70)	à	— 7°	sous	2 atmosphères.
Chlore	à	+ 15	sous	4 atm.
Hydrogène sulfuré (dté 0,9)	à	+ 10	sous	17 atm.
Acide carbonique	à	0	sous	36 atm.
Protoxide d'azote	à	+ 7°	sous	50 atm.
Cyanogène (dté 0,9)	à	+ 7°	sous	3,7 atm.
Acide muriatique (hydrochlorique)	à	+ 10°	sous	40 atm.
Gaz ammoniacal (dté 7,6)	à	+ 10°	sous	6,5 atm.

Chacun de ces liquides ainsi produits doit jouir, et jouit en effet, d'une grande élasticité; par une élévation subite de température, ils détonnent en général avec violence.

110. Lorsque la découverte importante de la liquéfaction des gaz fut annoncée à la société philomatique, je dis que j'avais, six ans auparavant, obtenu de l'euchlorine liquide en faisant passer ce gaz desséché dans un tube de verre entouré d'un mélange réfrigérant; que le liquide était verdâtre, qu'exposé à une chaleur très-légère, il avait produit une détonnation semblable à celle d'un coup de fusil, et que le tube de verre avait été réduit en poudre. Peu de temps après, on sut à Paris, par une lettre de M. Faraday, que la détonnation de ces sortes de liquides avait en effet ces caractères. Depuis cette époque, M. Bussy a liquéfié, par un mélange réfrigérant, le gaz acide sulfureux et d'autres gaz semblables; il a eu l'heureuse idée de faire servir ces liquides très-volatils à la production de

grands froids. Pour congeler le mercure, par exemple, on place sous une machine pneumatique une boule de thermomètre enveloppée d'acide sulfureux liquide. On fait le vide, et en quelques minutes le mercure est congelé.

On a proposé l'emploi des gaz condensés comme agens mécaniques. M. Perkins a même donné le modèle d'une machine mise en jeu par l'acide carbonique, alternativement liquéfié et gazifié; mais jusqu'à présent aucune machine de ce genre n'a été établie en grand.

111. La distinction des fluides élastiques en deux classes n'est donc plus admissible qu'entre certaines limites. On avait appelé gaz *permanens* les gaz qui, comme l'air atmosphérique, l'acide carbonique, etc., conservaient leur état gazeux, sous toutes les pressions et à toutes les températures; et gaz *non permanens* ou *vapeurs*, les fluides élastiques qui perdaient leur état par la compression ou par le refroidissement : tels sont tous les fluides aériformes qui proviennent de l'eau, de l'alcool, de l'éther sulfurique, des essences, etc. Nous venons de voir que des gaz considérés jusqu'à présent comme gaz permanens, deviennent liquides par de fortes compressions ou par de grands froids. L'air atmosphérique, les gaz azote, hydrogène, oxygène, n'ont pas encore été liquéfiés, mais il est très-probable qu'ils le seront un jour. Quoi qu'il en soit, la distinction peut être admise dans les circonstances ordinaires : ainsi prenez un tube semblable à celui qu'a employé M. Dalton pour déterminer les forces élastiques des vapeurs, au-dessus du point d'ébullition; introduisez-y de l'éther sulfurique, plongez la plus courte branche dans de l'eau chaude, le mercure de la plus grande branche sera bientôt soulevé par la vapeur; versez alors un peu d'eau froide sur la partie du tube qui renferme la vapeur d'é-

ther, et à l'instant la liquéfaction en sera opérée : voilà l'*effet du froid* sur les vapeurs. Replongez le tube dans l'eau chaude, la vapeur d'éther se formera de nouveau; mais vous la condenserez si vous ajoutez quelques décimètres de mercure dans la plus grande branche. Voilà l'*effet de la pression* sur les vapeurs.

Mélange des gaz.

112. Le mélange des gaz se fait de toute autre manière que celui des liquides; les liquides se placent dans l'ordre de leurs densités, à moins que l'action chimique ne détermine leur union intime; les gaz au contraire se mélangent indépendamment des densités et de l'affinité. Ce fait est prouvé par une expérience facile : qu'on réunisse deux ballons, l'un rempli de gaz hydrogène, et l'autre rempli de gaz acide carbonique; qu'on les place dans la position indiquée par la figure 91; le gaz le plus léger en haut, et le plus lourd en bas; qu'on examine au bout d'un certain temps le gaz de chaque ballon, on verra qu'il est le même, c'est-à-dire composé de mêmes quantités d'acide carbonique et d'hydrogène. Chaque gaz se répand dans tout l'espace, comme dans le vide; cette propriété des gaz dépend de leur porosité et de l'extrême mobilité de leurs particules, etc. On a remarqué que le mélange se fait d'autant plus vite que la différence des densités est plus grande.

113. Passons à la recherche de la force élastique d'un mélange de plusieurs gaz, la force particulière de chacun des gaz étant connue. Soit d'abord un volume V de gaz à la pression P, renfermé dans un vase inextensible; supposons qu'on y introduise un volume égal d'un autre gaz aussi à la pression P, l'élasticité totale sera évidemment

$P + P = 2P$. L'introduction d'un troisième volume V, à la même pression P, rendrait la force élastique totale égale à $P + P + P = 3P$; car c'est comme si l'on avait réduit à V d'abord le volume $2V$ et ensuite le volume $3V$, pris chacun à la pression P. Or, d'après la loi de Mariotte, la force élastique doit devenir $2P$ dans le premier cas, et $3P$ dans le second. Supposons que, le volume étant toujours V pour chaque gaz, les pressions ou les élasticités soient P, P', P'', etc.; la force totale sera $P + P' + P'' +$, etc., c'est-à-dire égale à la somme totale des élasticités particulières.

Si maintenant les volumes, au lieu d'être tous égaux à V, étaient V', V', V'', etc., différens de V, il faudrait calculer la force élastique de chaque gaz d'après la loi de Mariotte : par exemple, si l'élasticité correspondante au volume V', était P', on aurait l'élasticité de ce gaz introduit dans le volume V, par la proportion $V : V' :: P' : x = \frac{V'P'}{V}$. L'élasticité du mélange serait donc $P + \frac{V'P'}{V}$, après l'introduction du volume V' dans le volume V. Elle deviendrait $P + \frac{V'P'}{V} + \frac{V'P'}{V}$, après l'introduction du volume V', et ainsi de suite.

Mélange des Gaz et des Vapeurs.

114. Dans le mélange d'une vapeur et d'un gaz, la force élastique de la première s'ajoute à celle du gaz. Ce fait important, découvert par M. Dalton, peut se démontrer de plusieurs manières. Nous prendrons l'appareil (*fig.* 92) employé par M. Gay-Lussac. Cet appareil est formé d'un tube de verre cylindrique AB, divisé en par-

ties de capacité égale, et muni d'un robinet à chacune de ses extrémités. A quelques lignes au-dessus du robinet inférieur est adapté un tube de verre recourbé *a b*, de 2 à 3 lignes de diamètre. On remplit de mercure, récemment bouilli, l'appareil séché avec soin. Cela fait, on visse en *R* une vessie remplie d'air; et, après avoir établi la communication entre le tube et la vessie, l'on ouvre le robinet *R'* pour laisser écouler le mercure; on ferme les deux robinets quand la quantité d'air passée dans le tube est suffisante pour le but qu'on se propose. Pour ramener l'air du tube *A B* à la pression ordinaire, on verse du mercure par le tube *b a*, jusqu'à ce que le niveau soit établi dans les deux tubes.

Il s'agit maintenant d'introduire le liquide : on le fait d'une manière tout-à-fait certaine, par un petit artifice que voici : le robinet supérieur est échancré comme le montre le dessin *V*. On remplit du liquide un petit entonnoir fixé au robinet *R*; si l'on tourne ensuite le robinet, une certaine quantité de liquide tombe; on recommence jusqu'à ce que quelques gouttes apparaissent sur les parois.

On reconnaît, en faisant l'expérience, que le premier effet de la présence du liquide dans le tube est d'augmenter l'élasticité du gaz; mais cet effet n'est pas instantané, à cause de l'obstacle qu'oppose le gaz à la formation de la vapeur. La force élastique du mélange intérieur est maintenant plus forte que la pression extérieure. Le niveau de la petite branche est au-dessus de celui de la grande; on laisse écouler du mercure par le robinet inférieur jusqu'à ce que le niveau soit rétabli. Nous supposons toujours que, malgré l'accroissement du volume,

il y ait du liquide en excès; on le reconnaît en en introduisant une nouvelle quantité; s'il y en a un excès, l'addition de cette nouvelle quantité ne forme pas de vapeur, et n'accroît pas la force élastique du mélange. Il ne s'agit plus que de trouver la force élastique de la vapeur qui s'est formée dans le gaz.

La force élastique du gaz était au commencement de l'expérience égale à la pression extérieure que nous représenterons par H; le gaz alors occupait un certain nombre V de divisions du tube. Il en occupe maintenant un plus grand V'; sa force élastique a changé, d'après la loi de Mariotte, en raison inverse des espaces V et V'; elle est donc actuellement $\frac{VH}{V'}$. On connaît, par les tables, la force élastique de la vapeur dans le vide à la température de l'expérience; représentons-la par f. Si elle est la même dans les gaz, elle devra satisfaire à l'équation $\frac{VH}{V'}+f=H$. C'est en effet ce qu'on trouve. Il résulte de là qu'une vapeur, *en se mêlant à un gaz, conserve la tension qui lui est propre;* ainsi, dans le mélange des gaz et des vapeurs, comme dans le mélange des gaz entre eux, chacune des parties conserve la force élastique qu'elle posséderait si elle était isolée à la température et sous le volume actuels. Nous avons, pour la simplicité du calcul, ramené le mélange à la pression extérieure; mais nous serions arrivés à la même conséquence, quelle que fût l'élasticité du mélange.

115. Proposons-nous maintenant plusieurs questions qui se présentent fréquemment dans les recherches de physique et de chimie.

Par exemple, un volume de gaz sec étant donné à la pression H, on demande le changement qu'il éprouvera, si l'on introduit un liquide dont la vapeur à la même température a une force élastique f; d'abord le vase doit être extensible, sans quoi il n'y aurait pas de question. Le volume du gaz va s'accroître jusqu'à ce que son ressort, diminué par la dilatation, ajouté à la force élastique de la vapeur, fasse équilibre à la pression extérieure H. Quand le gaz cessera de s'étendre, sa force élastique, plus la tension de la vapeur f, sera égale à H; elle sera donc $H-f$; mais les forces élastiques des gaz sont en raison inverse des volumes. On aura donc la proportion

$$V : x :: H-f : H,$$

d'où $x = \frac{H.\ V}{H-f}$.

Faisons une application numérique : Soit $H = 0^m,76$; $f = 0^m,22$, $V = 50$ parties du tube, on aura $x = 70,37$ parties.

Le problème serait un peu plus compliqué si la température venait à changer, ainsi que la pression; il faudrait alors avoir recours au calcul (1).

---

(1) Soit un volume V d'un mélange de gaz et de vapeur à la température t, à la pression H, on demande ce que deviendra le volume à la température t' et à la pression H'.

Nous représenterons par f et f' les forces élastiques de la vapeur aux deux températures t et t'. Les forces élastiques de l'air sec seront $H-f$ et $H'-f'$, au commencement et à la fin de l'expérience. Mais nous savons que les volumes sont en raison inverse des forces élastiques : nous aurons donc

$$V : x :: H' - f' : H - f, \text{ d'où}$$

$$x = \frac{V(H-f)}{H'-f'}$$

Pour tenir compte du changement de température, il faut se rappeler

116. Il est souvent utile de savoir reconnaître, par le secours du calcul, si le changement d'élasticité d'un mélange, renfermé dans un vase inextensible, doit être attribué entièrement au changement de température. Ce cas se présente surtout dans les recherches sur la respiration des plantes et des animaux. La solution de cette question dépend uniquement des principes précédens. Soit un vase entièrement fermé et supposé inextensible; soit H la force élastique ou le ressort du mélange indiqué par un baromètre, et t la température; on observe, après une expérience, que la hauteur du baromètre est H', que la température est t'. On se propose de savoir si le changement de température a pu seul causer le changement d'élasticité observé.

Ici il n'est pas nécessaire de tenir compte de la variation du volume, puisque le volume est resté le même; seulement il faut faire attention que si la température d'un gaz, contenu dans un vase inextensible, change, son

---

(n° 63) que si la température t d'une masse de gaz devient t', les volumes successifs sont dans le rapport direct des dilatations, ou de $1 + at$ à $1 + at'$, a représentant le coëfficient de dilatation des gaz; ainsi la formule générale sera

$$x = \frac{V(H-f)(1+at')}{(H'-f')(1+at)}.$$

Application. Un volume d'air humide est de $55^{\text{lit.}},37$ à la température de 15°, et à la pression $0^{\text{m}},73$. On demande ce que deviendra ce volume à la température de 25°, et à la pression $0^{\text{m}},78$, sachant que la force élastique de la vapeur d'eau à 15° est de $0^{\text{m}},0128$ et à 25° de $0^{\text{m}},0231$.

On trouve, en raisonnant sur ces nombres comme sur la formule, que le nouveau volume est $\frac{55,37 \times 0,7172\ (1 + 0,00375 \times 25)}{0,757\ (1 + 0,00375 \times 15)}$, ou, en effectuant le calcul, $54^{\text{lit}},32$.

élasticité change exactement en raison du volume qu'il aurait pris par l'effet de la nouvelle température. Ainsi, si ce volume devait devenir double par l'élévation de température, la force de ressort deviendrait double, le volume restant le même. A l'époque où la température du mélange était t, la force élastique de la vapeur f, le ressort du gaz sec était $H-f$. Par le changement de température, le ressort est devenu $(H-f)\frac{1+at'}{1+at}$. En ajoutant à cette quantité la force élastique f' de la vapeur à la nouvelle température, la somme $(H-f)\frac{1+at'}{1+at}+f'$ devra être égale à H'. S'il en est ainsi, il n'y a eu ni absorption ni dégagement de gaz; dans le cas contraire, il y a eu absorption ou dégagement, selon que H' est plus petit ou plus grand que la somme dont il s'agit.

Application numérique.

Un ballon (*fig.* 93) *renferme de l'air humide; un thermomètre et un manomètre en font connaître la température et l'élasticité. La température change par une circonstance quelconque; on observe la nouvelle élasticité du mélange, et l'on demande s'il y a eu absorption ou dégagement.*

Données :

Température initiale :	15°.
Hauteur du manomètre :	$0^m,772$.
Force élastique de la vapeur à 15° :	$0^m,0128$.

Après le changement de température.

Température :	21°.

Élasticité du mélange : $0^m,778$.

Force élastique de la vapeur : $0^m,0183$.

La force élastique de l'air sec au commencement de l'expérience étant $H-f$, à la fin elle sera $(H-f) \times \frac{1+at'}{1+at}$; puisqu'évidemment elle aura augmenté dans le rapport des dilatations : or en effectuant les calculs, on trouve $(H-f) \times \frac{1+at'}{1+at} = 0,7592 \times \frac{1,07875}{1,05625} = 0,7592 \times 1,0213 = 0^m,077537$. Ajoutant à cela la force élastique de la vapeur $f' = 0^m,0183$, on a $0^m,79367$. S'il n'y avait eu ni dégagement, ni absorption de gaz dans le courant de l'expérience, on devrait trouver la pression $H' = 0^m,778$ indiquée par le baromètre; or, au contraire, on trouve une pression plus forte, il y a donc eu absorption (1).

On pourrait proposer d'autres problèmes, qu'on résoudrait avec la même facilité.

117. Tout ce qui précède est vrai aux températures élevées comme aux températures ordinaires; M. Dalton l'a encore constaté par l'expérience. Il est bien entendu que les vapeurs doivent être sans action chimique sur les gaz avec lesquels on les mêle; par exemple tout ce qui précède s'applique aux mélanges de vapeur

---

(1) Ici nous avons supposé le vase inextensible : mais s'il en était autrement, on observerait que, K étant le coëfficient de dilatation du verre, le ballon s'est dilaté dans le rapport de $1+Kt$ à $1+Kt'$. La force élastique de l'air sec a donc diminué dans le rapport de $1+Kt'$ à $1+Kt$, et conséquemment au lieu d'être comme ci-dessus $(H-f) \times \frac{1+at'}{1+at}$, elle est $(H-f)\left(\frac{1+at'}{1+at}\right)\left(\frac{1+Kt}{1+Kt'}\right)$

d'eau, de vapeur d'alcool, d'éther avec l'air atmosphérique, l'hydrogène, l'azote, l'oxygène; mais il n'en serait plus de même pour un mélange de gaz ammoniacal et de vapeur d'eau, de gaz hydrochlorique et de vapeur d'alcool, parce que l'action chimique s'exerce ici avec une grande énergie.

De l'Évaporation.

118. Un liquide exposé à l'air se dissipe avec plus ou moins de facilité; c'est là ce qu'on nomme évaporation.

On peut naturellement se demander quelle est l'influence de l'air sur l'évaporation. La présence de l'air ralentit l'évaporation, mais ne modifie nullement la quantité définitive de vapeur que peut admettre un espace; que cet espace soit plein d'air ou vide de toute matière, *il admet à une même température la même quantité de vapeur* : c'est ce qui résulte des expériences de M. Dalton, citées plus haut (n° 91), lesquelles nous ont appris que la force élastique d'une vapeur est la même dans le vide que dans un gaz quelconque; et déjà Saussure avait démontré dans son Hygrométrie que le maximum de vapeur qui s'élève dans un espace ne dépend que de la température.

L'obstacle qu'oppose l'air à la diffusion de la vapeur est mis en évidence dans une expérience de Fontana. Cet habile physicien a rempli d'eau deux cornues, à chacune desquelles il a adapté un ballon; il fit le vide dans l'un des appareils, et laissa l'air dans l'autre; puis chauffant lentement chaque cornue, il vit bientôt que la vapeur s'était condensée dans le ballon vide, tandis que l'évaporation, dans le vase plein d'air, avait été très faible.

Ainsi, il n'y a de différence entre l'air et le vide, qu'en ce que la vaporisation se fait lentement dans le premier, et rapidement dans le second.

119. Considérons maintenant la résistance qu'oppose l'air à l'évaporation; supposons d'abord ce fluide en repos et placé au-dessus de la surface d'une masse d'eau à la température ordinaire. La vapeur d'eau s'introduira d'abord entre les particules de la première couche d'air en contact avec le liquide; mais les particules de la seconde couche doivent s'opposer à son ascension (*fig.* 94), de sorte que si le calme est parfait, l'évaporation sera extrêmement lente. Jamais ce cas ne se présente dans la nature; l'agitation de l'air est toujours plus ou moins grande : elle favorise singulièrement l'évaporation, et à tel point que celle-ci aurait la même rapidité dans un air très-agité que dans le vide. Pour s'en convaincre, qu'on prenne un linge mouillé, qu'on le fasse tourner avec force à l'extrémité d'une fronde, et il suffira d'un petit nombre de tours pour le dessécher complètement.

120. Une circonstance qui affaiblit l'évaporation à l'air libre, c'est que jamais il n'est dépourvu d'humidité; dans les temps les plus secs, il renferme toujours au moins les deux dixièmes de l'humidité qu'il peut contenir; et, toutes les autres circonstances étant les mêmes, on conçoit que l'évaporation sera d'autant moindre que la quantité d'eau contenue dans l'air approchera plus du maximum.

121. Il se présente maintenant une question dont la solution offre un grand intérêt; avec quelle rapidité se fait l'évaporation dans un air calme aux diverses températures? M. Dalton a traité cette question avec sa sagacité ordinaire. Le tableau suivant comprend les résultats

qu'il a obtenus depuis la température de l'ébullition de l'eau jusqu'à 58°,8.

Température.	Force élastique de la vapeur.	Évaporation par minute.
100	0,76	1g,92
82,2	0,38	0,96
73,3	0,26	0,64
66,6	0,19	0,55
66,2	0,16	0,38
58,8	0,13	0,32

A l'inspection de ce tableau, on voit que la quantité d'eau, évaporée à chaque température, est sensiblement proportionnelle à la force élastique de la vapeur. Ce résultat devrait être modifié par la quantité de vapeur contenue dans l'air; cela serait, en effet, si la tension de la vapeur aux températures rapportées n'était incomparablement plus grande que celle de la vapeur que renferme l'air. Par exemple, à la température de 11 degrés, la tension de la vapeur au maximum n'est que 10^{mm}, c'est-à-dire $\frac{1}{76}$ de celle qui répond à l'ébullition. Une aussi petite quantité ne peut avoir qu'une très-légère influence.

122. Le même physicien, pour apprécier l'influence de l'humidité de l'atmosphère, a fait à de basses températures les expériences dont nous venons de rapporter les principaux résultats; et il a reconnu que, dans les mêmes circonstances de repos ou d'agitation de l'air, la quantité de liquide évaporé était constamment proportionnelle à $f-f'$, c'est-à-dire à la quantité d'eau qui manque à l'air pour sa saturation complète. Nous dirons plus bas comment M. Dalton détermine l'état hygrométrique de l'air.

La formule $A\frac{(f-f')}{F}$, tirée de la proportion $x : A :: f-f' : F$, représente tous les résultats. A est la quan-

tité d'eau évaporée à la température de l'ébullition; F est la tension de la vapeur à cette température; f la tension totale que la vapeur peut acquérir à la température de l'expérience; f' la tension de la vapeur qui se trouve dans l'air. Ainsi, supposons qu'à la température de l'ébullition, sous la pression $0^m,76$, on ait trouvé que l'évaporation était de $12^g,25$ par minute, on aura, pour la quantité d'eau évaporée sous la tension $f-f'$:

$$x = \frac{12,25\,(f-f')}{0,76} \quad (a)$$

Sa valeur, ainsi calculée, diffère peu de ce que donne l'expérience.

M. Dalton a encore porté son attention sur la vaporisation des liquides différens de l'eau, et le résultat de ses recherches est à peu près celui auquel devaient conduire les conditions d'indépendance, reconnues dans le mélange des substances aériformes. Ainsi, il a trouvé que la vaporisation de l'alcool est proportionnelle à la tension qui lui est propre à la température où l'on fait l'expérience. Il a vu de plus que la quantité absolue de liquide évaporé est proportionnelle à la force élastique. Il en résulte que la formule (a) est encore applicable dans ce cas.

123. Pour compléter l'histoire de l'évaporation, il faut rappeler les principales idées des physiciens sur la formation de la vapeur et sur son mode d'existence dans l'air.

En 1751, Musschenbroch, physicien hollandais, avait assimilé la diffusion de la vapeur dans l'air à la dissolution des sels dans l'eau. Leroi, de Montpellier, développa cette théorie. Elle fut d'autant mieux accueillie qu'elle tendait à faire rentrer ce phénomène inexpliqué sous la

puissance de l'attraction. Leroi crut voir que l'air dissolvait l'eau de la même manière et avec les mêmes circonstances que l'eau dissout les sels. Ainsi, de même que l'eau, en s'échauffant, devient capable de dissoudre une nouvelle quantité de sel, et abandonne, par le refroidissement, une partie de celui qu'elle avait dissout, de même l'air, à mesure qu'il s'échauffe ou se refroidit, exige plus ou moins d'eau pour son maximum de saturation. Le fait de l'accroissement de la quantité d'eau que peut contenir l'air à mesure que sa température s'élève, est vrai, mais les conséquences qu'en tire Leroi ne sont pas exactes. L'affinité de l'air pour l'eau ne joue aucun rôle dans l'évaporation; car nous savons, depuis Saussure, que la quantité d'eau que peut admettre un espace est la même, que cet espace soit vide ou plein d'air : la cause productrice de la vapeur c'est la chaleur, et cette vapeur se répand dans l'air indépendamment de toute action chimique.

DE L'HYGROMÉTRIE.

124. L'*hygrométrie* est la partie de la physique dans laquelle on recherche les différens degrés d'*humidité* de l'air. Les instrumens employés à cet effet sont appelés *hygromètres* ou *hygroscopes*.

Dans les temps où l'air paraît le plus sec, il renferme beaucoup de vapeur. Pour rendre celle-ci manifeste, on n'a qu'à placer dans l'air un vase rempli d'un mélange réfrigérant, en quelques minutes la vapeur se déposera à l'état de glace sur les parois du vase : une simple carafe remplie d'eau froide, la précipiterait à l'état liquide.

125. Voyons comment on détermine les quantités de vapeur, que contient l'air dans différentes circonstances. Dans le cas de saturation complète, les tables des forces élastiques de la vapeur suffiraient pour les trouver. Supposons par exemple que la température soit à 11°; d'après la table (n° 91) la force élastique de la vapeur sera $0^m,010$; un litre d'air à la pression $0^m,010$, pèserait $\frac{10}{760}$ ou $\frac{1}{76}$ de $1^g,299$ (poids d'un litre d'air sous la pression $0^m,760$) ou $0^g,017$. Mais la densité de la vapeur d'eau, sous la même pression, n'est que les $\frac{10}{16}$ de celle de l'air; il faudrait donc réduire ce poids dans le rapport $\frac{10}{16}$; ce qui donnerait $0^g,0106$. Ce petit calcul met le lecteur en état de déterminer la quantité absolue de vapeur contenue dans un volume d'air connu supposé à l'état de saturation; il est seulement indispensable, pour la correction du calcul, de tenir compte de l'effet de la dilatation sur l'air; c'est à-dire de

diviser le poids $1^{g},299$ d'un litre à zéro par le nombre $1 + 0^{m},00375 \times t$; 0,00375 étant le coëfficient de dilatation des gaz, et t la température de l'air.

126. On peut toujours par des expériences directes déterminer la quantité absolue de vapeur contenue dans l'air, quel que soit son degré de saturation. Pour cela on le met en contact avec un poids connu de chlorure de calcium, de chaux ou de toute autre matière très-avide d'eau. Ce procédé est susceptible d'une grande précision. On se propose en général dans l'hygrométrie de connaître non pas la quantité absolue d'eau, mais seulement le degré d'humidité de l'air; nous verrons d'ailleurs que sans expériences et seulement avec la connaissance du degré de l'hygromètre et du thermomètre on parvient au même résultat définitif que par des expériences très-longues et très-pénibles.

Toutes les substances exposées à l'air libre varient dans leurs dimensions et dans leur poids : ainsi les cordes à boyaux, employées dans les instrumens de musique, changent de tension et de ton; le papier, le parchemin, perdent leur élasticité; les barbes de certaines graminées, les cheveux lessivés, éprouvent des changemens considérables; le verre lui-même augmente de poids d'une manière bien sensible, comme Fontana et M. Gay-Lussac l'ont constaté. Ces divers corps peuvent servir à la construction des hygromètres. Nous décrirons avec détails l'hygromètre de Saussure, qui est le plus important de tous les instrumens de ce genre.

127. La partie principale de l'hygromètre de Saussure est un cheveu; mais le cheveu dans l'état naturel est recouvert d'une matière grasse qui le défend, jusqu'à un certain point, de l'action de l'humidité; les variations qu'il éprouve dans

cet état ne sont pas régulières; il faut donc le préparer. Après avoir fait choix des cheveux les plus doux, on en forme un paquet de la grosseur d'un tuyau de plume; on le fait bouillir pendant vingt à trente minutes dans une eau contenant un centième de carbonate de soude; les cheveux sont ensuite lavés et séchés. Ils doivent être doux, transparens, brillans. La dilatation des cheveux bien préparés est de $\frac{1}{50}$ de la longueur depuis la sécheresse extrême jusqu'à l'humidité extrême, tandis que les cheveux non dépouillés de leur matière grasse ne se dilatent que de $\frac{1}{200}$, et encore d'une manière irrégulière.

Le cheveu ainsi préparé est fixé à sa partie supérieure par le moyen d'une pince *d* (*fig.* 95) et roulé à la partie inférieure autour d'un axe horizontal; à cet axe est attachée une aiguille dont les mouvemens sont mesurés sur un cercle gradué. Le cheveu est tenu vertical par un contrepoids de 15 centigrammes = 3 grains, suspendu à un fil de soie enroulé sur le même cylindre; quand par l'absorption d'une petite quantité d'eau de l'air le cheveu s'allonge, le contre-poids fait tourner le cylindre et par suite marcher l'aiguille; au moyen de cette disposition, une variation très-petite dans la longueur du cheveu, devient sensible par le mouvement beaucoup plus considérable qu'elle occasione dans l'aiguille.

128. Pour rendre comparables tous les hygromètres construits sur les mêmes principes, Saussure prend deux termes, dont l'un est celui de l'extrême humidité, et l'autre celui de l'extrême sécheresse. Il détermine le premier en plaçant l'hygromètre sous un récipient de verre plongeant dans l'eau et dont il mouille les parois; l'air sous ce récipient est nécessairement saturé. Le cheveu s'allonge, et au

bout d'une heure, il est arrivé à l'humidité extrême. Saussure note le point où s'arrête l'aiguille. Il porte ensuite l'instrument sous une autre cloche aussi petite que possible; le carbonate de potasse, avide d'eau, est ce qu'il emploie pour matière desséchante; il prend un morceau de tôle de fer, qui peut entrer sous la cloche, qui en occupe toute la hauteur et la moitié de la largeur; il la couvre de carbonate de potasse et la chauffe jusqu'au point de la faire rougir; alors il la laisse refroidir assez pour que son contact n'occasione pas la rupture de la cloche; il place cette tôle ainsi garnie sous la cloche avec l'hygromètre, qu'il laisse dans cette position jusqu'à ce que l'aiguille soit stationnaire. Au moment où il est renfermé avec le carbonate de potasse, l'hygromètre marche au sec avec une grande rapidité, au point de faire vingt-cinq degrés dans les dix premières minutes; mais peu à peu sa marche se ralentit et il fait sur la fin à peine un degré en vingt-quatre heures. Si le sel est convenablement préparé, l'hygromètre se fixe au bout de trois jours. Ce point est marqué zéro et indique la sécheresse extrême; l'intervalle entre les deux termes fixes vaut cent parties; chaque partie prend le nom de degré : (*Ess. sur l'hygrom.*, 13-15-23).

Il y a cette différence entre l'hygromètre et le thermomètre, que les deux points fixes du premier répondent à deux états absolus, tandis que les deux points fixes du second consistent en deux limites prises au milieu d'une série de points qui s'étend indéfiniment au-dessus et au-dessous de ces limites.

129. Plaçons maintenant l'hygromètre dans une masse d'air. L'action du cheveu sur la vapeur d'eau est tout-à-fait semblable à celle des substances desséchantes. Il absorbe

peurs jusqu'à ce que son affinité affaiblie ne puisse récipiter. Supposons d'abord l'espace complète-saturé de vapeur; on observe que l'hygromètre mar- umidité extrême, quelle que soit d'ailleurs la tem- ature. Puisque le cheveu, dans les diverses circon- ces, s'allonge de la même quantité, il absorbe la même té d'eau : la quantité pondérable de vapeur contenue l'air est cependant d'autant plus grande que la tem- e est plus élevée; mais la plus légère force suffit précipiter la vapeur d'un espace saturé; l'action du eu est une force de ce genre; et comme la quantité xige le cheveu pour sa saturation, est très-petite relativement à celle qui se trouve dans l'air, il doit en prendre la même quantité, quelle que soit la température : voilà pourquoi il marque constamment le même point dans un air saturé. Nous faisons ici abstraction des changemens que la chaleur produit dans les dimensions du cheveu.

Supposons que l'espace ne soit pas complètement saturé, la vapeur ne cèdera plus à une force très-faible pour se précipiter, puisqu'elle peut résister à un certain degré de pression et à un certain degré de refroidissement. Il en résulte que l'effet du cheveu s'arrêtera au moment où l'action qu'il exerce sur les vapeurs sera égale à la force de pression nécessaire pour les précipiter.

130. D'après tout ce qui vient d'être dit sur l'hygromètre, on voit que cet instrument n'indique que le plus ou le moins d'humidité de l'air, et nullement la quantité absolue de vapeur; il serait donc d'une grande importance de connaître les rapports entre les divers degrés de l'hygromètre, et les quantités d'eau correspondantes. Ce travail avait été entrepris par de Saussure (*Essais*—96);

ce physicien renfermait un hygromètre dans un ballon contenant un volume connu d'air sec; il y plongeait un linge mouillé et déterminait la perte du poids du linge, pour que l'instrument marchât d'un nombre déterminé de degrés. Ou bien il mettait dans le ballon de l'air primitivement saturé et le portait à divers degrés de sécheresse, en observant en même temps la marche de l'hygromètre. Nous ne rapporterons pas les tables qu'il a ainsi construites, parce qu'elles ne présentent pas une grande exactitude; nous nous bornerons à dire qu'il avait remarqué que l'effet de l'humidité sur le cheveu est d'autant moins grand que l'air approche plus du point de la saturation.

M. Gay-Lussac a entrepris le même travail et a suivi une méthode qui est à la fois simple et rigoureuse. Cette méthode consiste à déterminer la correspondance de l'hygromètre à la tension de la vapeur. Ce rapport étant déterminé, il suffit de se rappeler la densité $\frac{10}{16}$ de la vapeur d'eau pour pouvoir calculer le poids absolu de l'eau contenue dans l'air (*voyez* le commencement de l'*Hygrométrie*). On place l'hygromètre dans une grande cloche à pied en partie remplie d'eau pure ou d'acide sulfurique convenablement concentré, de manière à donner les différens degrés de saturation de l'air depuis l'humidité complète jusqu'à la sécheresse extrême. On détermine à chaque expérience la tension du liquide dans le vide à la même température. L'hygromètre est fixé à un disque de verre luté hermétiquement. Bientôt cet instrument se met en équilibre avec les vapeurs contenues dans l'air, et s'arrête à un certain degré de sa division.

Les tables suivantes résultent d'expériences faites à la

température de dix degrés. On pourrait étendre l'usage de ces tables à toute autre température. Cependant il est bon d'avertir que le résultat de cette proportionnalité indiquerait une quantité de vapeur un peu trop faible au-dessus de 10 degrés, et un peu trop forte au-dessous. Car nous avons vu que les forces élastiques des vapeurs croissent plus rapidement que les températures (n° 96).

TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromèt. à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromèt. à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromèt. à cheveu.
0	0,00	34	57,42	68	84,06
1	2,19	35	58,58	69	84,64
2	4,37	36	59,61	70	85,22
3	6,56	37	60,64	71	85,77
4	8,75	38	61,66	72	86,31
5	10,94	39	62,69	73	86,86
6	12,93	40	63,72	74	87,41
7	14,99	41	64,63	75	87,95
8	16,92	42	65,53	76	88,47
9	18,91	43	66,43	77	88,99
10	20,91	44	67,34	78	89,51
11	22,81	45	68,24	79	90,03
12	24,71	46	69,03	80	90,55
13	26,61	47	69,83	81	91,05
14	28,51	48	70,62	82	91,55
15	30,41	49	71,42	83	92,05
16	32,08	50	72,21	84	92,54
17	33,76	51	72,94	85	93,04
18	35,43	52	73,68	86	93,52
19	37,11	53	74,41	87	94,00
20	38,78	54	75,14	88	94,48
21	40,27	55	75,87	89	94,95
22	41,76	56	76,54	90	95,43
23	43,26	57	77,21	91	95,90
24	44,75	58	77,88	92	96,36
25	46,24	59	78,55	93	96,82
26	47,55	60	79,22	94	97,29
27	48,86	61	79,84	95	97,75
28	50,18	62	80,46	96	98,20
29	51,49	63	81,08	97	98,69
30	52,81	64	81,70	98	99,10
31	53,96	65	82,32	99	99,55
32	55,11	66	82,90	100	100,00
33	56,27	67	83,48		

DEGRÉS de l'hygromèt. à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromèt. à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromèt. à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.
0	0,00	34	17,10	68	44,89
1	0,45	35	17,68	69	46,04
2	0,90	36	18,30	70	47,19
3	1,35	37	18,92	71	48,51
4	1,80	38	19,54	72	49,82
5	2,25	39	20,16	73	51,14
6	2,71	40	20,78	74	52,45
7	3,18	41	21,45	75	53,76
8	3,64	42	22,12	76	55,25
9	4,10	43	22,79	77	56,74
10	4,57	44	23,46	78	58,24
11	5,05	45	24,13	79	59,73
12	5,52	46	24,86	80	61,22
13	6,00	47	25,59	81	62,89
14	6,48	48	26,32	82	64,57
15	6,96	49	27,06	83	66,24
16	7,46	50	27,79	84	67,92
17	7,95	51	28,58	85	69,59
18	8,45	52	29,38	86	71,29
19	8,95	53	30,17	87	73,39
20	9,45	54	30,97	88	75,29
21	9,97	55	31,76	89	77,19
22	10,49	56	32,66	90	79,09
23	11,01	57	33,57	91	81,09
24	11,53	58	34,47	92	83,08
25	12,05	59	35,37	93	85,08
26	12,59	60	36,28	94	87,07
27	13,14	61	37,31	95	89,06
28	13,69	62	38,34	96	91,25
29	14,23	63	39,36	97	93,44
30	14,78	64	40,39	98	95,63
31	15,36	65	41,42	99	97,81
32	15,94	66	42,58	100	100,00
33	16,52	67	43,73		

La première table donne le degré de l'hygromètre correspondant à la tension de la vapeur; c'est le contraire pour la seconde.

Si l'on voulait faire usage de ces tables pour une application numérique, il faudrait prendre $9^{mm},48$ pour la tension maximum de la vapeur d'eau à 10°. Le nombre $9^{mm},48$ est représenté par 100 dans la colonne des tensions.

s tables montrent qu'il n'existe aucune propor-
ite ntre l'allongement du cheveu et le degré d'hu-
l'air. Elles fournissent les résultats suivans :

Degré de l'hygromètre.	Eau de l'air.
0	0
22	$\frac{1}{10}$
29	$\frac{2}{10}$
53	$\frac{3}{10}$
64	$\frac{4}{10}$
72	$\frac{5}{10}$
79	$\frac{6}{10}$
85	$\frac{7}{10}$
90	$\frac{8}{10}$
95	$\frac{9}{10}$
100	$\frac{10}{10}$

132. Ayant eu occasion de rechercher le poids de la vapeur contenue dans l'air à une même température et à différens degrés de l'hygromètre, je rapporterai ici le calcul et les résultats. Ces résultats expriment les quantités de vapeur aqueuse contenues dans un mètre cube d'air à la température de 10°, correspondant aux différens degrés de l'hygromètre à cheveu, comptés de 10 en 10 depuis 0 jusqu'à 100; on sait d'ailleurs que la force élastique de la vapeur d'eau à 10° est de $0^{m},00948$.

Le poids d'un litre d'air à 0° et à $0^{m},76$ étant $1^{g},299$, le poids du même volume d'air à 10° et à la pression

$0^m,00948$ sera $\frac{1,299 \times 0,00948}{1,0375 \times 0,76}$; et puisque la densité de la vapeur est les $\frac{10}{16}$ de celle de l'air, le poids d'un litre de vapeur d'eau à 10° sera $\frac{1,299 \times 9,48}{1,0375 \times 76 \times 16}$. Or un mètre cube contient mille litres, puisque le litre équivaut à un décimètre cube. Le poids d'un mètre cube de vapeur à la température de 10° est donc égal à 1000 fois ce dernier poids, c'est-à-dire à $\frac{1299 \times 9,48}{1,0375 \times 76 \times 16}$, ou bien en effectuant les calculs $9^g,761$.

En multipliant ce nombre constant par le rapport de la tension de la vapeur à un certain degré de l'hygromètre, à la tension totale représentée par 100 dans le tableau, et dont la valeur absolue est $0^m,00948$, on aura les quantités de vapeur qui se trouvent dans un mètre cube d'air aux différens degrés de l'hygromètre, et qui sont indiquées dans le tableau suivant:

Degrés de l'hygromètre.	Vapeur contenue dans un mètre cube d'air.
0 degrés.	0 grammes.
10	0,446
20	0,922
30	1,443
40	2,028
50	2,713
60	3,541
70	4,606
80	5,976
90	7,720
100	9,761

ns tout ce qui précède nous n'avons pas eu
fet pyrométrique. Par exemple, si l'air dans
st placé l'hygromètre, subit une élévation de tem-
. sans recevoir de nouvelles vapeurs, le cheveu
it par l'évaporation d'une partie de l'eau qu'il
me, d'un autre côté il s'échauffe et s'allonge : de
n'observe que la différence des deux effets.
re (*Essais sur l'hygromètre*, n° 81) a construit
qui offre une indication approximative des effets
Il a formé cette table en observant l'in-
e d'un degré de température sur son hygromètre,
successivement aux différens points de l'échelle.

Table des différentes variations qu'un degré de chaleur produit dans l'hygromètre à cheveu, suivant le degré d'humidité qu'il indique.

Degrés de l'hygromèt.	Variations pour un degré de chaleur.	Degrés de l'hygromèt.	Variations pour un degré de chaleur.	Degrés de l'hygromèt.	Variations pour un degré de chaleur.
25	0,450	50	1,283	75	2,145
26	0,483	51	1,316	76	2,196
27	0,517	52	1,350	77	2,251
28	0,550	53	1,383	78	2,311
29	0,583	54	1,416	79	2,374
30	0,616	55	1,450	80	2,441
31	0,650	56	1,483	81	2,494
32	0,683	57	1,516	82	2,545
33	0,716	58	1,550	83	2,594
34	0,750	59	1,583	84	2,642
35	0,783	60	1,616	85	2,689
36	0,816	61	1,650	86	2,734
37	0,850	62	1,683	87	2,777
38	0,883	63	1,716	88	2,819
39	0,916	64	1,750	89	2,860
40	0,950	65	1,783	90	2,899
41	0,983	66	1,816	91	2,937
42	1,016	67	1,850	92	2,973
43	1,050	68	1,883	93	3,008
44	1,083	69	1,916	94	3,042
45	1,116	70	1,950	95	3,074
46	1,150	71	1,983	96	2,427
47	1,183	72	2,016	97	1,780
48	1,216	73	2,054	98	1,552
49	1,250	74	2,098	99	1,325
				100	1,000

134. A l'inspection de cette table, on voit que les variations de l'hygromètre suivent une marche sensiblement régulière depuis le 25° degré de l'échelle jusqu'au 72°; elles croissent ou décroissent selon une progression arithmétique dont la raison est $\frac{1}{30}$ environ.

Faisons une application de cette table à un exemple: dans une plaine, l'hygromètre marque 50 degrés, à la température de 15° Réaumur. Le même instrument porté sur une montagne voisine, où la température est 8°, marque 56 degrés. On demande lequel des deux lieux est

plus humide. Au 50e de l'hygromètre un abaissement d'un degré du thermomètre fait varier l'hygromètre de 1,3; il ne s'agit que de prendre la somme de la progression dont le premier terme est 1,3, la raison $\frac{1}{10}$ et le nombre de termes 7, et l'on trouve 9°,8. Ainsi l'hygromètre devrait marquer sur la montagne au moins 59°,8. Il n'y marque que 56°, l'air renferme donc moins d'eau.

135. Disons un mot des autres hygromètres. Celui des académiciens del Cimento était un vase de forme conique, plein de glace ou de neige, suspendu la pointe en bas: les vapeurs de l'air se condensent sur sa surface; elles tombent sous forme de gouttes, et, par la fréquence des gouttes, on juge du degré de l'humidité de l'air.

136. Leroi emploie un moyen plus simple, et qui a fixé l'attention des physiciens dans ces derniers temps; un verre est en partie rempli d'eau à la température environnante, et, par une addition successive d'eau à zéro, on voit la vapeur se précipiter sur les parois extérieures du verre, et on note avec soin la température à laquelle la précipitation commence.

Saussure répète ce procédé, et ne le croit pas propre à donner des résultats bien rigoureux. Cependant, M. Dalton, qui l'a soumis à un grand nombre d'épreuves, assure que la vapeur commence à se condenser sur la surface du verre lorsque la température de l'eau est abaissée seulement d'un demi-degré au-dessous de celle que la vapeur de l'air peut supporter. Supposons qu'on connaisse avec exactitude la température de la précipitation de la vapeur, et que ce soit 12° par exemple: on cherchera dans la table des tensions élastiques, on trouvera 10mm,7 à cette température; supposons que la température de l'air sous

l'expérience soit de 18°, on prendra dans la même table la force élastique correspondante $15^{mm},4$; on pourra ainsi estimer la quantité de vapeur qui manque à l'air pour sa saturation complète, et dont la tension est $4^{mm},7$ égale à $15^{mm},4$, moins $10^{mm},7$.

137. M. Leslie a proposé un hygromètre qui n'est autre chose que son thermomètre différentiel légèrement modifié. L'une des boules est couverte d'un linge clair mouillé; l'évaporation produit du froid, et la liqueur monte d'un certain nombre de degrés. Le temps nécessaire pour déterminer cet effet n'excède jamais deux minutes. La graduation de cet hygromètre se fait en déterminant le froid produit dans un air complètement dépouillé de vapeur d'eau. Comme le froid produit est proportionnel à l'évaporation, il en résulte que si le froid, dans une observation, est la moitié du froid maximum, il manque à l'air la moitié de la vapeur qui lui est nécessaire pour sa saturation complète, et ainsi de suite. Cet instrument n'est pas si commode qu'on le croirait d'abord. On sait que le froid varie avec la température et avec la pression, de sorte qu'il est nécessaire d'avoir des tables du froid produit à diverses températures et à diverses pressions; par exemple, si l'on devait faire servir cet hygromètre sur une montagne, il faudrait y déterminer préalablement le froid maximum dans un air sec à la température et à la pression de cette montagne. Quoi qu'il en soit, cet hygromètre est simple, d'une construction facile, et a l'avantage de faire connaître immédiatement la quantité de vapeur qui se trouve dans l'air, et d'être moins altérable que les hygromètres construits avec des substances organiques (*On heat and Moisture*).

138. On avait proposé anciennement un hygromètre consistant en une boule d'ivoire remplie de mercure, adaptée à un tube de verre très-capillaire, (*fig.* 96). M. Daniel Wilson a remplacé la boule d'ivoire de cet instrument par une vessie de rat, convenablement préparée. La graduation se fait comme celle de l'hygromètre de Deluc; cet instrument jouit, selon M. Wilson, d'une grande sensibilité. (*Ann. de ch. et de ph.*, 5e.) Il est représenté dans la figure 96.

139. L'hygromètre de Deluc est peu différent de celui de Saussure; il lui est un peu postérieur; le cheveu y est remplacé par une bandelette de baleine très-mince, et cette bandelette est tendue au moyen d'un ressort. Pour avoir la sécheresse extrême, on place l'instrument sous une cloche remplie d'air sec; quant à l'humidité extrême on l'obtient en plongeant la bandelette toute entière dans l'eau. Comme il y a une différence de plus de dix degrés entre l'imbibition et l'humidité extrême, et comme d'ailleurs cet instrument ne doit servir que dans l'air humide, on conçoit qu'il est préférable de le graduer comme celui de Saussure.

140. M. Babinet a apporté à l'hygromètre de Saussure une modification qui rend cet instrument plus simple dans sa construction, et plus exact dans ses indications. Le poids de l'hygromètre modifié est librement suspendu au cheveu, dont on mesure l'allongement directement, en visant, avec un microscope fixe, un repère gravé sur ce poids. Le cheveu est attaché par sa partie supérieure à une vis micrométrique au moyen de laquelle on la relève ou on l'abaisse jusqu'à ce que le trait de repère coïncide avec le fil du microscope; l'allongement est donné par le mouvement de la vis micrométrique.

141. M. Dulong s'est occupé de la comparaison des hygromètres de Saussure et de Deluc; mais il a abandonné ses travaux au moment où M. Gay-Lussac a commencé les siens : il règne un accord parfait entre les observations de M. Gay-Lussac et celles de M. Dulong relatives à l'hygromètre à cheveu, comme on va le voir par le tableau suivant, extrait des observations originales de M. Dulong, qui malheureusement sont égarées. Dans le tableau la densité de la vapeur à 13°,9 pour la saturation complète est représentée par 100.

Densités de la vapeur à 13°,9	Hygromètre de Deluc.	Hygromètre de Saussure.
0,0997	12°,2	28
0,1980	18,0	44
0,2976	22,5	55
0,4876	31,8	75
0,5912	37,5	84
0,6844	45,5	91
0,7797	54,0	92
0,8774	58,0	97,5
0,9762	70,0	102

Si l'on compare les densités de la vapeur aux degrés de l'hygromètre, 55 et 92, on trouve dans la table de M. Dulong 0,382 pour le rapport.

Si l'on compare aux mêmes degrés de l'hygromètre les tensions dans les tables construites d'après les expériences de M. Gay-Lussac, on a le même rapport 0,382.

142. Il résulte du tableau précédent que l'hygromètre de Deluc est plus sensible que celui de Saussure vers l'humidité extrême, ce qui est un avantage; car dans la nature l'air n'est jamais très-rapproché de la sécheresse extrême : ainsi Saussure n'a pas vu l'hygromètre au-dessous de 40, et il a remarqué qu'en général il se tient à 60 degrés. Il paraît qu'à la surface de la terre le 30e degré est le point

le plus bas auquel se soit tenu cet instrument. Ainsi en général l'air renferme les quatre dixièmes de l'eau qu'il peut contenir.

Capacités des corps pour la chaleur.

143. Dans l'état actuel des sciences on ignore complètement les quantités absolues de chaleur renfermées dans les corps, on ne connaît pas même les rapports de ces quantités. Tout ce que les recherches des physiciens ont appris sur ce sujet, se borne à la connaissance du rapport des quantités de chaleur nécessaires pour que les principaux corps, pris sous la même masse, varient d'un nombre déterminé de degrés de l'échelle thermométrique. Ces quantités, qui sont les capacités pour la chaleur ou *les chaleurs spécifiques*, sont très-différentes dans les différens corps.

Pour donner une idée de l'influence de la chaleur spécifique dans les expériences, il suffira de citer un exemple. Si l'on mêle un kilogramme d'eau à zéro, avec un kilogramme de fer à 11°, le mélange ne marque que 1 degré, ce qui fait voir que la chaleur qu'abandonne le fer et qui fait baisser sa température de 10 degrés, n'élève la température de l'eau que d'un seul degré.

Le docteur Wilke paraît être le premier qui ait introduit dans la science le nom de chaleur spécifique. Ses expériences datent de 1781.

Il existe trois méthodes par le moyen desquelles on parvient à connaître les chaleurs spécifiques; nous les exposerons successivement.

144. *La première méthode* est due à MM. Lavoisier et Laplace.

Le calorimètre (*fig.* 97) de ces savans célèbres est très-simple et très-ingénieux. Il consiste en trois cavités circulaires et concentriques. L'une, qui occupe le centre, est destinée à renfermer le corps dont on désire connaître la chaleur spécifique; l'autre est remplie de glace, dont le corps fond une partie en se refroidissant; la troisième, la plus extérieure, est aussi remplie de glace et défend celle qui entoure immédiatement le corps de l'action de l'air environnant : car l'air qui s'introduit dans le calorimètre arrive dans la seconde cavité à la température zéro, puisqu'il a pris la température de la glace extérieure. On reçoit dans un vase particulier l'eau provenant de la glace fondue par le corps.

Ce procédé est fondé sur ce qu'un poids déterminé de glace pris à zéro exige pour se fondre la quantité de chaleur qu'abandonne un pareil poids d'eau pris à 75°, en se refroidissant jusqu'à zéro. Si donc on porte à 75° des corps différens et de même poids, et qu'on les place successivement dans la petite cage *C* en fil de fer, les quantités de glace fondue, comparées à celle que fond une même masse d'eau prise à la même température, représenteront les chaleurs spécifiques. Il faut avoir l'attention, quand on emploie ce procédé, de laisser au moins pendant dix heures les corps dans le calorimètre, afin d'être bien certain de les refroidir jusqu'à la température de la glace.

Pour les corps liquides, et pour ceux qui exercent une action chimique sur la glace, comme les acides, les sels, les alcalis, il faut les renfermer dans un vase qu'on a soumis d'abord à une expérience préliminaire pour connaître la glace qu'ils fondent seuls.

Si les corps n'avaient pas tous le même poids et la même température 75°, on ramènerait facilement les ré-

sultats à la même unité de poids et à la même température 75° (1).

Tableau des capacités déterminées par le calorimètre de glace, par MM. Lavoisier et Laplace.

Eau.	1,0000
Soufre..	0,2085
Fer battu.	0,1105
Étain.	0,0475
Plomb.	0,0282
Mercure.	0,0290
Oxide rouge de mercure. . . .	0,0501
Minium.	0,0623
Chaux vive.	0,2169
Verre sans plomb.	0,1929
Acide nitrique, d^té = 1,298. . . .	0,6614
Acide sulfurique, d^té 1,87. . . .	0,3346
Solution de nitre. . { nitre 1 / eau 8 }. .	0,8187
Huile d'olive.	0,3096

Le calorimètre est un instrument fort ingénieux; les résultats qu'il fournit sont rigoureux; cependant on doit préférer, ou la méthode des mélanges, ou celle du refroidissement. La longue durée de l'expérience, et la nécessité d'une quantité considérable de glace, sont des conditions que ne présentent pas les deux dernières méthodes.

Méthode des Mélanges.

145. Cette méthode est généralement attribuée à Crawford, savant physicien anglais, à qui on doit un ouvrage

(1) Si g est le poids de la glace fondue par un corps dont le poids est p, et la température t, $\frac{g}{t \times p}$ sera le poids de la glace fondue par ce même corps ramené à l'unité de poids et de température.

sur la chaleur (*On animal heat*). Le célèbre Black en avait parlé dans ses leçons, vers 1760, et elle s'était probablement déjà présentée à l'esprit d'autres observateurs. Cette méthode consiste à mélanger deux corps pris à des températures différentes : l'eau est ordinairement le corps froid. Si les corps ont la même masse, il est visible que les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des variations des températures; car si le fer, dans l'exemple cité au commencement de l'article 143, a perdu 10 degrés de température en abandonnant une quantité de chaleur qui n'a fait varier la température de l'eau que d'un seul degré, nécessairement la quantité de chaleur qu'exigerait une masse d'eau, pour varier d'un nombre déterminé de degrés, serait dix fois plus grande que celle dont une même masse de fer aurait besoin, pour que sa température changeât du même nombre de degrés. Il est sous-entendu que la variation de température n'est pas assez grande pour que la capacité des corps change d'une manière sensible.

146. Comme on ne prend pas en général les corps sous le même poids, nous allons indiquer comment on peut trouver les capacités, quels que soient les poids employés.

Soient, M la masse d'eau froide, C sa capacité, t sa température, m la masse du corps chaud, T sa température, C' sa capacité, et T' la température du mélange, la température de l'eau s'est élevée de $T'-t$; la quantité de chaleur absorbée par ce liquide peut être exprimée par $MC(T'-t)$; car il est clair que la chaleur nécessaire pour qu'un corps varie d'un certain nombre de degrés est proportionnelle à sa masse et à sa capacité. La perte de chaleur éprouvée par le corps chaud peut aussi être représen-

tée par $m\,C'\,(T-T')$; or, le gain égale la perte. On aura donc l'équation $M\,C\,(T'-t) = m\,C'\,(T-T')$ d'où l'on tire $\frac{C'}{C} = \frac{M\,(T'-t)}{m(T-T')}$. Comme le second membre ne renferme que des quantités connues par l'expérience, on déduira facilement le rapport $\frac{C'}{C}$; et, enfin, si C est égal à l'unité, comme on a coutume de le supposer, les capacités des corps seront comparées à celle de l'eau prise pour unité. Le vase qui renferme l'eau exerce une influence proportionnelle à sa masse P et à sa capacité C'', en sorte que dans l'application il faut remplacer M par $M+PC''$.

Exemple : 8521$^{gr.}$,25 de fer à la température de 55°,42 mélangés avec 25421$^{gr.}$,18 d'eau à 15°,17 ont élevé la température de ce liquide à 16°,59.

L'eau est renfermée dans une caisse en cuivre très-mince, du poids de 1377$^{gr.}$,3; ces 1377$^{gr.}$,3 équivalent à une masse d'eau égale à 1377$^{gr.}$,3 × 0,095 ou à 130$^{gr.}$,8 d'eau, 0,095 étant la capacité du cuivre. Ainsi la masse totale d'eau chauffée est 25552$^{gr.}$,5. En remplaçant les lettres M, m, T, t T' par leurs valeurs, on trouve 0,110 pour la capacité du fer.

147. Si l'on voulait, par la méthode des mélanges, connaître la capacité d'un liquide ou d'un corps qui eût de l'action chimique sur l'eau, on renfermerait ce corps dans un vase dont il faudrait tenir compte. Si, par exemple, le poids de ce vase était P et la capacité de sa substance C'', alors son influence serait PC'', de sorte que ce que nous avons représenté dans notre formule par $m\,C'$, serait réellement $PC''+m\,C'$.

Il est plusieurs précautions à prendre pour assurer

l'exactitude des opérations. D'abord on rendra la masse de la caisse qui renferme l'eau froide aussi petite que possible; ensuite on n'opérera qu'à des températures assez basses pour que l'évaporation de l'eau, produite par l'immersion d'un corps très-chaud, ne soit pas une cause d'erreur; enfin on observera le refroidissement de l'appareil, afin d'établir la correction de la perte de chaleur, faite pendant l'expérience. En remplissant ces conditions, la méthode des mélanges peut être exacte et commode dans beaucoup de circonstances.

Méthode du Refroidissement.

148. Cette troisième méthode est fondée sur l'observation des temps qu'emploient les différens corps pris sous le même volume, et portés à la même température, pour se refroidir d'un égal nombre de degrés. Il faut avoir l'attention de donner à tous les corps la même surface rayonnante. Si les corps sont liquides ou en poudre, on les renfermera successivement dans un même vase cylindrique très-mince. On fait ordinairement usage d'un vase en argent ou en cuivre. Si on veut comparer les chaleurs spécifiques de deux corps solides, du fer et de l'étain, par exemple, on peut former avec ces substances des cylindres égaux en volume, et observer les temps du refroidissement; et comme deux métaux, même très-polis, ont des pouvoirs rayonnans inégaux, il faut absolument leur donner la même surface. On y parvient de la manière suivante, comme je l'ai fait, je crois, le premier. On observe d'abord le refroidissement des [illegible]lindres suspendus dans l'air par des fils de soie [illegible] temps; on couvre les cylindres d'une [illegible] on observe de

nouveau, et ainsi de suite. Maintenant, il doit sortir de chacun des deux corps la même quantité de chaleur dans le même temps, puisque la surface, l'excès de la température sur celle du milieu, le volume, tout est pareil de part et d'autre; les quantités totales de chaleur qu'auront abandonnées les deux corps seront donc dans le rapport des temps. Or, pour un intervalle donné de température, la quantité de chaleur qu'abandonne un corps est proportionnelle à sa masse et à sa chaleur spécifique; donc, si m et m', désignent les masses, c et c' les chaleurs spécifiques, θ et θ' les temps du refroidissement, $T - t$ l'abaissement de température, on aura $m\,c\,(T-t)$, et $m'\,c'\,(T-t)$ pour les expressions des quantités de chaleur perdues, et conséquemment $m\,c : m'\,c' :: \theta : \theta'$.

Résultats du refroidissement après l'application des couches.

Polis	Fer.	9′,56″
	Étain.	4′,37″
1re couche	Fer.	5′,44″
	Étain.	2′,43″
2e couche	Fer.	5′,40″
	Étain.	2′,37″
3e couche	Fer.	5′,40″
	Étain.	2′,37″

Par l'application de la seconde couche de vernis pour les deux métaux, le rayonnement a été porté au maximum; les temps du refroidissement sont 5′,40″ et 2′,37″. Puisque les deux corps ont le même volume, il est per-

mis de substituer les densités aux masses; les densités sont 7,788 et 7,291. En faisant les substitutions on obtient 100 à 49,32 pour le rapport des capacités du fer et de l'étain.

149. Dans le cas des corps liquides ou des corps pulvérisés, on les place dans un vase, dont il faut nécessairement tenir compte. Si p est le poids du vase, c' sa capacité; les quantités de chaleur perdues pendant les temps θ et θ' seront proportionnelles à $p\,c' + m\,c$ et $p\,c' + m'\,c'$, de sorte qu'on aura $p\,c' + m\,c : p\,c' + m'\,c' :: \theta : \theta'$. Nous ferons l'application de cette formule à la détermination de la capacité de l'huile d'olive comparée à la capacité de l'eau que nous prendrons pour unité.

Les données de l'expérience sont : poids du vase d'argent $56^g,36$; capacité de ce métal 0,055.

Le vase contenait $147^g,04$ d'eau à une certaine température, et se refroidissait de 30°,2 en 21′; le même vase contenait $144^g,04$ d'huile d'olive à la même température, et perdait 30°,2 en 12′,12′. En mettant les valeurs numériques dans la proportion, on en déduit 0,58 pour la capacité de l'huile d'olive (1).

Tableau des capacités déterminées par la Méthode du refroidissement.

Eau		1,000	
Vinaigre		0,9200	*D.*
Acide nitrique	(dt 1,30)	0,66	*D.*

(1) Il est possible que cette capacité ne soit pas parfaitement exacte, l'expérience n'a été faite qu'une fois : on n'a voulu d'ailleurs que fournir une application numérique.

Suite des capacités déterminées par la Méthode du refroidissement.

Acide hydrochlorique	(d^té 1,153)	0,60	*D.*
Acide sulfurique	(d^té 1,84)	0,35	*D.*
Alcool	(d^té 0,817)	0,70	*D.*
	(d^té 0,793)	0,622	+
Éther sulfurique	(d^té 0,76)	0,66	*D.*
	(d^té 0,715)	0,520	+
Essence de térébenth.	(d^té 0,872)	0,462	+
Bois de pin		0,65	*M.*
— de chêne		0,57	*M.*
— de poirier		0,50	*M.*
Flint glasse		0,19	*D.*
Chlorure de sodium		0,23	*D.*

(D. Dalton + Despretz, M. Meyer.)

MM. Dulong et Petit ont cherché, en suivant la méthode du refroidissement, les capacités des principaux métaux et du soufre. Les résultats de leurs recherches sont :

Eau	1,0000	Argent	0,0557	Fer	0,1100
Bismuth	0,0288	Zinc	0,0927	Cobalt	0,1498
Plomb	0,0293	Tellure	0,0912	Soufre	0,1880
Or	0,0298	Cuivre	0,0949		
Platine	0,0314	Nikel	9,1035		
Etain	0,0314				

Les auteurs de ces recherches ont fait une remarque importante, c'est que le produit de la capacité d'un corps simple par le poids de son atome donne un nombre constant, et très-peu différent de 0,375. Il résulte de là que les capacités des corps simples pour la chaleur sont en raison inverse des poids des atomes. Les résultats des expériences de MM. Laroche et Béra z satisfont encore assez bien à cette loi.

150. On peut se demander maintenant si les chaleurs spécifiques sont les mêmes à toutes les températures, ou si elles sont variables : l'hypothèse qui admet que la capacité des corps augmente avec l'élévation de température est la plus probable. Telle était aussi l'opinion de M. Dalton; et des expériences de MM. Dulong et Petit qui ne laissent rien à désirer sous le rapport de la précision, ont établi le fait de l'accroissement de la chaleur spécifique d'une manière incontestable. Dans ces expériences chaque corps était porté successivement à diverses températures et plongé dans une masse connue d'eau froide. On aura une idée de la variation de la capacité par la seule inspection du tableau des résultats.

	Capacités moyennes entre 0 et 100°.	Capacités moyennes entre 0 et 300°.
Mercure	0,0330	0,0350
Zinc	0,0927	0,1015
Antimoine	0,0507	0,0547
Argent	0,0557	0,0611
Cuivre	0,0940	0,1013
Platine	0,0335	0,355
Verre	0,177	0,190

Résultats particuliers fournis par le fer.

Capacité moyenne entre 0 et 100° = 0,1098
0 à 200° = 0,1150
0 à 300° = 0,1218
0 à 350° = 0,1255

Chaleurs spécifiques des Gaz.

151. La détermination des chaleurs spécifiques des gaz présente beaucoup de difficultés. Aussi les essais des différens physiciens n'ont-ils donné que des résultats peu concordans. Le travail de MM. Laroche et Bérard se distin-

gue par son étendue et le soin que les auteurs ont mis dans leurs expériences.

RÉSULTATS.

Chaleurs spécifiques des principaux Gaz.

	A volumes égaux.	A poids égaux.
Air atmosphérique	1,0000	1,000
Hydrogène	0,9033	12,3401
Oxygène	0,9765	0,8848
Azote	1,000	1,0318
Acide carbonique	1,2588	0,8280
Oxide d'azote	1,3503	0,8878
Oxide de carbone	1,0340	1,0805
Gaz oléfiant	1,5530	1,5763
Vapeur aqueuse	1,960	3,1360

MM. Laroche et Bérard ont obtenu ces déterminations en faisant passer des volumes égaux de différens gaz dans un serpentin entouré d'une quantité d'eau froide, bien connue en poids. Chaque gaz, en sortant du gazomètre, traverse un premier serpentin plongé dans une huile portée à la même température pour tous les gaz. Le gaz arrive dans le calorimètre et y dépose une partie de sa chaleur; la température du calorimètre s'élève, et cette température est à son maximum quand le calorimètre perd, par le contact de l'air et le rayonnement, une quantité de chaleur égale à celle qu'il reçoit du gaz, et comme on sait (*voy.* la *Loi du refroidissement*) que la perte de chaleur qu'éprouve un corps placé dans cette circonstance est proportionnelle à l'excès de sa température sur la température de l'espace environnant, comme d'ailleurs le gaz, en passant dans le calorimètre, lui restitue la chaleur qu'il perd, il s'ensuit que la quantité de chaleur qu'abandonne le gaz est aussi proportionnelle à l'excès de la température du calorimètre (1). Sans aucun

(1) Soient m, c, T la masse, la capacité et la température d'un des gaz;

doute, ces physiciens ont suivi ces recherches avec la même persévérance et la même sagacité dont ils ont fait preuve dans leurs autres travaux. Mais malheureusement, les résultats sont l'expression d'un phénomène composé. On mesure à la fois et la chaleur dégagée par la condensation et celle qu'abandonne le gaz par le refroidissement. Il faudrait qu'on pût isoler l'une ou l'autre de ces quantités. Une autre erreur provient de ce que les gaz n'étaient pas dépouillés d'eau.

152. Les mêmes physiciens ont comparé les chaleurs spécifiques à l'eau, et ont trouvé :

Eau	1,0000	Hydrogène	3,2936
Air	0,2669	Oxide d'azote	0,2369
Oxygène	0,2361	Gaz oléfiant	0,4207
Azote	0,2734	Oxide de carbone	0,2884
Acide carbonique	0,2210	Vapeur aqueuse	0,8470

M. W. T. Haycraff, par suite d'expériences faites sur des gaz desséchés, a admis que les gaz simples et les gaz composés sous le même volume, à égale pression, ont la même capacité. MM. Dulong et Petit, après l'examen des expériences de MM. Laroche et Bérard, avaient admis la même loi

---

m', c', t les quantités correspondantes pour l'autre gaz;

θ la température du lieu des observations;

θ' la température maximum du calorimètre dans l'expérience du premier gaz;

θ'' la quantité correspondante pour le deuxième gaz; on aura :

$$m\,c\,(T-\theta') : m'\,c'\,(t-\theta'') :: \theta'-\theta : \theta''-\theta.$$

Dans cette proportion tout est connu, à l'exception du rapport des capacités $\frac{c}{c'}$. On pourra donc l'en tirer, et si l'un des gaz est l'air, par exemple celui dont la capacité est c, on fera $c = 1$, ce qui donnera la capacité de l'autre gaz rapportée à la capacité de l'air prise pour unité.

pour les gaz simples seulement. M. Haycraff l'étend aux gaz composés; il faudrait peut-être de nouvelles expériences pour établir la vérité sur ce sujet.

LOIS DU REFROIDISSEMENT.

153. Un corps chaud abandonné à lui-même dans l'espace perd d'autant plus de chaleur dans un temps donné que sa température est plus élevée au-dessus de celle du milieu environnant.

Le refroidissement dans le vide est dû au rayonnement seul du corps; dans l'air ou dans un gaz quelconque, la perte occasionée par le contact du fluide s'ajoute à celle que produit le rayonnement.

154. Newton admit *à priori*, (*Scala graduum caloris, Phil. trans.*, 1701) qu'un corps échauffé et soumis à une cause constante de refroidissement telle que l'action d'un courant d'air uniforme, éprouve à chaque instant une perte de chaleur proportionnelle à l'excès de sa température sur celle du milieu environnant; et que conséquemment les pertes de chaleur doivent former une progression géométrique décroissante (*voy.* les additions). Kraft et Richmann l'ont vérifié par l'expérience. La loi de Newton représente assez exactement la marche du refroidissement d'un corps quand l'excès de sa température sur celle du milieu ne surpasse pas 30 à 40 degrés. Mais au-delà, l'écart entre l'expérience et le calcul est d'autant plus grand que l'excès est plus considérable : ce qui résulte des expériences de Martine et de Erxleben, de Laroche et de M. Dalton, de M. Leslie, et, plus récemment, de celles de MM. Dulong et Petit.

155. Nous allons faire connaître les principaux résultats du beau travail de ces deux derniers savans :

Refroidissement d'un Thermomètre dans l'air.

Excès de température sur celle de l'air.	Vitesse du refroidissement d'un thermomètre dont la boule a deux centimètres de diamètre.
100°	18°,92
80	14,00
60	9,58
40	5,93
20	2,75

La vitesse du refroidissement est le nombre de degrés perdus pendant un temps choisi pour unité.

La colonne des vitesses montre l'inexactitude de la loi de Newton, même dans un intervalle de cent degrés, puisque les rapports entre deux vitesses successives sont 1, 3; 1, 4; 1, 6; 1, 7.

On voit aussi que si le refroidissement était proportionnel à l'excès de la température du corps sur celle du milieu, la vitesse correspondante à l'excès de température 100°, devrait être cinq fois plus grande que celle qui correspond à 20°. Cette dernière vitesse est 2°,75; la loi de Newton la donnerait égale à 3°,78, la différence est environ d'un degré.

La même expérience répétée avec des thermomètres très-différens par leur masse ou leur forme, et avec des corps autres que le mercure, donne toujours la même loi; c'est-à-dire le même rapport entre deux vitesses consécutives. *La loi du refroidissement est donc la même pour tous les corps.*

Refroidissement dans le vide.

Excès de température sur celle de l'espace.	Vitesse du refroidissement.
240°	10,69
220	8,81
200	7,40
180	6,10
160	4,19
140	3,88
120	3,82
100	2,30
80	1,34

Ce tableau met bien mieux que le tableau précédent en évidence l'inexactitude de la loi qui suppose le rayonnement proportionnel à l'excès de température; car, d'après cette loi, la vitesse du refroidissement à 200° devrait être double de la vitesse à 100°; la 2e colonne de ce tableau nous montre qu'elle est presque triple. Nous pouvons aussi rapporter quelques expériences de Laroche : dans ces expériences, on recueille la chaleur rayonnante sur un miroir métallique, bien poli. L'effet sur le thermomètre placé au foyer du miroir est évidemment proportionnel à la perte qu'éprouve le corps par le rayonnement, l'absorption par l'air étant presque nulle dans un petit intervalle.

Excès de la température d'un creuset plein de mercure.	Effet sur le thermomètre focal.	Effet calculé dans la supposition que le rayonnement est proportionnel à l'excès de la température des corps.
81°	4,7°	4,7°
172	18,1	10,0
205	17,4	11,84

Il résulte donc des expériences de Laroche, de MM. Dulong et Petit, que le rayonnement des corps se fait, et dans le vide et dans l'air, par une loi différente que celle qu'avaient admise Newton et Richmann, conséquence à laquelle étaient déjà arrivés Erxleben et Martine par des expériences moins précises. Si l'on part d'une température basse

pour aller à une température élevée, le refroidissement est plus rapide que ne l'indique la loi de Newton; il est plus lent dans le cas contraire. C'est ce qui se voit bien dans les tableaux rapportés ci-avant. On commettrait donc de graves erreurs en admettant l'exactitude de cette loi.

156. MM. Dulong et Petit sont parvenus à une formule qui représente bien tous les progrès du refroidissement dans le vide ou dans un gaz quelconque. Cette formule sort des calculs qu'on peut se permettre dans un livre élémentaire. Nous nous bornerons à indiquer les principaux résultats auxquels ces savans physiciens ont été conduits. (*Ann. de ch. et de phys.*, t. VII; *Journ. de l'École polyt.*, t. II.) *Voyez*, pour les calculs, les notes à la fin de l'ouvrage.

Du Refroidissement dans le vide.

157. Les expériences rapportées précédemment, faites dans un espace vide ou plein d'air, entretenu à une température constante, ont montré l'inexactitude de la loi de Newton dans les deux cas. Les expériences dont il s'agit actuellement nous feront connaître l'influence de la température de l'enceinte sur la vitesse du rayonnement d'un corps dont la température surpasse d'une quantité constante la température de cette enceinte.

On a inscrit dans le tableau suivant les résultats de plusieurs expériences dans lesquelles la température de l'enceinte a crû suivant une progression arithmétique.

Excès de température du thermomètre.	Vitesse de refroidissement dans l'enceinte à 0°	Vitesse de refroidissement dans l'enceinte à 20°	Vitesse de refroidissement dans l'enceinte à 40°
240°	10,69	12,40	14,35
220	8,81	10,41	11,98
200	7,40	8,58	10,01
180	6,10	7,04	8,20
160	4,89	5,67	6,61
140	3,88	4,57	5,52
120	3,02	3,56	4,15
100	2,30	2,74	3,16
80	1,74	1,99	2,30

Les vitesses du refroidissement dans l'enceinte successivement portée à zéro et à 20°, sont dans le rapport de $\frac{12,40}{10,69} = 1,16$. C'est là aussi le rapport des vitesses de la troisième et de la quatrième colonne $\frac{14,35}{12,40} = 1,16$. Deux vitesses correspondantes quelconques donneraient le même rapport. Il résulte de là que le rayonnement croît, pour un même excès, avec la température de l'enceinte. De plus, on peut énoncer l'accroissement de la manière suivante :

La vitesse de refroidissement d'un thermomètre, dans le vide, pour un excès constant de température, croît en progression géométrique, quand la température de l'enceinte croît en progression arithmétique. Le rapport de cette progression géométrique est le même, quel que soit l'excès de température que l'on considère.

Du Refroidissement dans l'air et dans les gaz.

158. Les lois du refroidissement dans le vide étant connues, rien n'est plus simple que d'apprécier la portion de chaleur perdue par le contact d'un fluide élastique; il suffit d'observer dans le fluide le refroidissement d'un corps qu'on a déjà observé dans le vide; l'effet dû au contact du fluide sera la différence entre ces deux effets.

Thermomètre ayant sa surface naturelle.

Excès de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte.	Vitesse dans l'air.	Vitesse dans le vide.	Différence ou vitesse due au contact seul.
200°	14°,04	8°,56	5°,48
180	11,76	7,01	4,75
160	9,85	5,68	4,17

Même expérience avec le Thermomètre ayant sa surface argentée.

200°	6°,93	1°,50	5°,43
180	6,02	1,23	4,79
160	5,19	1,00	4,19

L'inspection de la quatrième colonne fait voir que l'air enlève la même quantité de chaleur aux surfaces vitreuses et aux surfaces métalliques. Le gaz hydrogène a fourni le même résultat; ainsi, vu la grande différence de nature entre le verre et l'argent, entre l'air et le gaz hydrogène, on peut dire *que les pertes de chaleur dues au contact d'un gaz sont, toutes choses égales d'ailleurs, indépendantes de l'état de la surface du corps qui se refroidit.*

Cette loi avait déjà été admise par M. Leslie; mais l'ingénieux physicien anglais ne l'avait présentée que comme une conséquence vraisemblable de deux expériences indirectes, qui consistent à prouver que l'état de la surface n'a plus qu'une influence très-légère sur le refroidissement total dans les circonstances où le rayonnement ne peut plus contribuer que pour une partie très-petite à la perte de chaleur.

D'autres expériences faites sur le refroidissement, dans une enceinte remplie successivement d'air, de gaz hydrogène et d'acide carbonique, ont appris que la perte due au contact seul d'un gaz dépend, pour un même excès de température, de la densité et de la température du fluide.

Mais cette dépendance est telle, *que la vitesse du refroidissement reste la même si la densité et la température du gaz changent, sans faire changer l'élasticité.* (*Voyez* les additions pour plus de détail.)

159. Il entre dans notre plan de faire connaître autant que possible les appareils employés dans les recherches, quand ils réunissent l'exactitude et la simplicité. L'appareil de MM. Dulong et Petit est dans ce cas. La figure 98 le représente en entier.

L'enceinte dans laquelle s'observe le refroidissement est formée par un grand ballon en cuivre très-mince, *M M*, dont le diamètre est d'environ trois décimètres; le col saillant de ce ballon est terminé par une surface plane. On la rend horizontale à l'aide d'un niveau. Ce ballon est fixé dans une grande cuve cylindrique de bois, pleine d'eau. Les parois de ce ballon étant très-minces et très-conductrices, prennent constamment la température de l'eau qui les environne, et, étant recouvertes intérieurement de noir de fumée, elles ne réfléchissent qu'une portion excessivement petite de la chaleur que leur envoie le corps chaud.

L'orifice du ballon est fermé par une plaque épaisse de verre *C D*, usée avec un grand soin sur les bords du ballon. Par l'interposition d'une substance grasse, on rend le contact entre les surfaces très-intime, et l'on empêche toute communication avec le dehors.

La plaque *C D* est percée à son centre d'une ouverture circulaire, dans laquelle on introduit à frottement un bouchon portant la tige d'un thermomètre. Le volume du thermomètre est assez considérable pour qu'il ne s'abaisse que d'un petit nombre de degrés, pendant qu'on dispose l'appareil : la tige du thermomètre est recouverte par un

tube *A B;* ce tube est terminé dans sa partie supérieure par une pièce à robinet *R*, à laquelle est fixé un tuyau de plomb très-flexible *H K;* l'autre extrémité de ce tuyau est fixée à la platine d'une machine pneumatique qui porte un baromètre pour qu'on connaisse le degré d'élasticité de l'air intérieur. Quand on introduit un gaz dans ce ballon, on a soin de le dessécher par son passage dans un tube rempli de chlorure de calcium.

160. La masse, la capacité, la faculté conductrice, l'état de la surface, la nature du milieu environnant, exercent une influence très-grande sur le refroidissement. Nous considérerons successivement ces divers points.

L'analyse démontre que le rapport des temps du refroidissement de deux sphères est égal au rapport des carrés des diamètres, si ces sphères ont de grandes dimensions, et seulement égal au rapport simple des mêmes diamètres, si les sphères sont petites. (*Théorie de la chaleur*, de M. Fourier.) Je rapporterai ici deux de mes expériences dont les résultats sont assez d'accord avec l'analyse. Une boule de zinc du diamètre de $0^m,067$ a perdu 10 degrés de chaleur en $4',21''$; une autre boule du même métal du diamètre de $0^m,093$ a perdu 10 degrés en $6',29''$.

L'état des surfaces était le même; le pouvoir rayonnant avait été porté au maximum par l'application d'un vernis; le rapport des temps du refroidissement est 1,48, celui des diamètres est 1,40; le résultat de l'expérience est intermédiaire entre les deux résultats indiqués par l'analyse, parce qu'en effet les diamètres des deux boules ne sont ni très-grands, ni très-petits.

La capacité (n° 143), la conductibilité, ont aussi une très-grande influence sur le refroidissement. Par exem-

ple, toutes les autres circonstances d'ailleurs égales, une masse d'eau exigera beaucoup plus de temps pour se refroidir [illegible] un certain nombre de degrés, qu'une même masse de cuivre dont la capacité n'est que les $\frac{95}{1000}$ de celle de l'eau. On conçoit avec la même facilité que le refroidissement est d'autant plus rapide que le mouvement de la chaleur est plus fac[illegible]térieur du corps. (*Voyez* plus loin la *conducti*[illegible]

L'agitation de l'[illegible] singulièrement le refroidissement, comme une [illegible] observations journalières nous l'apprennen[illegible]

La rapidité [illegible]etroidi[illegible] dépend encore de l'état de la surface. [illegible]sultats tirés de mes expériences.

Une boule de fer poli de $0^m,067$ de diamètre s'est refroidie de 10 degrés en 9',54'. La même boule, rouillée par son exposition à l'air humide, a perdu 10 degrés en 6'.

Couverte d'une couche de vernis, elle a fait la même perte en 5',44'; enfin, couverte de deux autres couches, elle s'est refroidie encore plus vite, puisqu'elle n'a exigé que 5',40' pour perdre le même nombre de degrés.

Nous donnerons plus de développement à cette dernière partie, parce qu'elle est susceptible de nombreuses applications, et qu'elle nous fournira l'occasion d'approfondir la théorie de la chaleur rayonnante.

DE LA RÉFLEXION ET DU RAYONNEMENT DE LA CHALEUR; DE PLUSIEURS PHÉNOMÈNES QUI Y ONT RAPPORT.

161. Il paraît que c'est à Schéele qu'on doit une des premières observations qui démontrent l'influence de l'état de la surface relativement au pouvoir réfléchissant des

corps. Cet illustre chimiste ayant exposé un miroir concave, métallique et poli, en face de l'ouverture d'un poêle dans lequel le bois brûlait avec activité, observa que ce miroir réfléchissait toute la chaleur qui arrivait sur sa surface, puisqu'il ne s'échauffait pas sensiblement. Si l'on enduisait la surface de noir de fumée, le miroir s'échauffait au point qu'on ne pouvait plus tenir impunément la main sur sa partie convexe.

162. Déjà nous avons vu que le rayonnement varie avec l'état de la surface, la température restant la même; d'après cela on doit s'attendre à trouver les pouvoirs rayonnans différens pour les différens corps; c'est, en effet, ce qui résulte de l'observation. Ce sont particulièrement les travaux de MM. Leslie et de Rumford qui ont concouru aux progrès que la physique a faits dans cette partie; ces savans célèbres ont enrichi la science d'une foule de faits aussi curieux qu'importans. La théorie physique de la chaleur en a reçu une vive lumière, et les arts en ont tiré d'importantes applications.

163. Il est bien démontré que l'état de la surface modifie le rayonnement de la chaleur; il reste à rechercher maintenant les pouvoirs rayonnans des différens corps.

Un des procédés les plus simples est celui qui a été mis en pratique par M. Leslie; il consiste à recueillir sur un miroir métallique la chaleur émise par différens corps portés à une même température. A cet effet, ce physicien célèbre prend un cube creux de fer blanc (*fig.* 99); il couvre la face *A* avec du papier, la face *B* avec une lame de verre, la face *C* avec une lame de plomb, et il laisse la face *D* dans l'état naturel. Il remplit ce cube d'eau à une

température connue, en général, à 95 degrés. Plaçant ce cube à trois pieds de distance du miroir, au foyer duquel est la boule focale de son thermomètre différentiel, il observe l'effet produit sur ce thermomètre; il présente successivement les trois autres faces, en ayant soin de remplir toujours le cube avec de l'eau à la même température. Cette température est donnée par un thermomètre, plongeant dans l'eau même. En multipliant les expériences, on obtient les pouvoirs rayonnans des différens corps. La durée de toutes les expériences doit être évidemment la même; le changement de température du milieu est sans influence sur les résultats, puisque l'action de ce milieu est la même sur les deux boules.

On remarque que l'effet produit sur la boule focale par les métaux polis, est très-faible comparativement à celui que produisent les autres substances, comme le papier, le verre, le noir de fumée. L'air atmosphérique, le miroir réflecteur, absorbent une certaine quantité de chaleur. Mais comme cette absorption est peu considérable, et d'ailleurs sensiblement proportionnelle aux quantités de chaleur émises par les différens corps, on peut regarder les effets observés comme indiquant l'ordre des pouvoirs rayonnans. Voici la table qui a été formée, en représentant par 100 le plus grand effet produit.

Tableau des Pouvoirs rayonnans.

Noir de fumée	100
Eau	100
Papier blanc	98
Verre	90

Encre de Chine	88
Eau glacée	85
Mercure	20
Plomb	19
Fer poli	15
Étain, cuivre, argent, or	12

Comme nous avons vu que les substances qui se refroidissent le plus vite s'échauffent aussi le plus rapidement, il faut en conclure que les surfaces qui, toutes choses égales d'ailleurs, émettent le plus de chaleur, en absorbent aussi une plus grande quantité.

164. Pour connaître les pouvoirs réfléchissans, on couvre successivement la surface du miroir de diverses substances, et on reçoit à chaque fois la chaleur réfléchie sur la boule focale. Dans cette détermination, il est bien sous-entendu que la même surface est tournée vers le miroir et que l'eau du cube est renouvelée à chaque expérience. L'effet thermométrique est proportionnel à la chaleur réfléchie par le miroir à son foyer; et, comme il en absorbe toujours la même proportion, il en résulte que les effets observés représentent bien l'ordre des pouvoirs réfléchissans.

165. Il y a un second procédé fondé sur cette remarque : si, entre le foyer principal et le miroir, on place un miroir plan, ce miroir plan réfléchira les rayons sans altérer leur inclinaison sur l'axe; de sorte que si mF et $m'F$ (*fig.* 100) sont deux rayons parallèles réfléchis, allant concourir en un point F; le miroir plan $a\,b$ interposé réfléchira en a et b les rayons $m\,F$ et $m'\,F$, et déterminera leur réunion en F'; et, vu l'égalité des triangles $F\,a\,K$ et

F' à K, on aura $KF = KF'$. Il suffit donc de faire l'expérience en plaçant successivement en K une lame des diverses substances qu'on veut examiner, et d'observer l'effet produit au foyer secondaire F'. Cet effet est nécessairement plus faible que celui qu'on obtient par la première méthode; mais, comme la diminution est la même dans toutes les expériences, les rapports des effets ne sont pas altérés.

Tableau des Pouvoirs réflecteurs.

Cuivre jaune	100
Argent	90
Étain en feuilles	80
Acier	70
Plomb	60
Verre	10
Verre huilé	5
Noir de fumée	0

Ce petit tableau fait voir que les substances (les métaux polis) qui jouissent de la propriété d'émettre le moins de chaleur, la réfléchissent en grande abondance; et qu'au contraire celles qui, comme le noir de fumée, le verre, ont un pouvoir rayonnant considérable, ne jouissent que d'un pouvoir réflecteur très-faible, de sorte que les pouvoirs réflecteurs sont en ordre inverse des pouvoirs émissifs. De même, les pouvoirs réflecteurs de deux corps sont d'autant plus faibles que leurs pouvoirs absorbans sont plus forts, mais ils ne sont pas en raison inverse. En effet, soit 1 la quantité de chaleur reçue par une surface, a la quantité absorbée, $1 - a$ sera la chaleur réfléchie; si une surface

possède un pouvoir absorbant double, elle retiendra $2a$, et n'en réfléchira que $1 - 2a$; or, il est évident que les quatre nombres $1 - a$, $1 - 2a$, $2a$, a ne forment pas une proportion.

Non-seulement le poli, mais encore la nature intime des substances, a une influence sur le rayonnement et la réflexion de la chaleur, puisque deux substances différentes qui ont reçu le même poli, réfléchissent, et émettent la chaleur inégalement. Quel que soit le poli d'un corps, il ne réfléchit jamais en totalité la chaleur qui tombe sur sa surface.

166. Dans le cours de ces expériences on a occasion de faire une remarque importante relativement à la théorie physique de la chaleur, c'est que la réflexion et le rayonnement ne s'opèrent pas seulement à l'extrême superficie, mais à une certaine profondeur. Les expériences rapportées au commencement de ce chapitre (n° 148) prouvent bien en effet que la profondeur à laquelle commence le rayonnement est appréciable, puisqu'il a fallu l'application de plusieurs couches de vernis pour le porter au maximum. Pour constater que la réflexion commence aussi à une certaine profondeur, il suffit de recevoir la chaleur rayonnante d'une source quelconque sur un miroir métallique poli, et de couvrir ce miroir successivement de couches minces de vernis. On verra que la première couche affaiblira considérablement le pouvoir réflecteur, mais qu'elle ne le réduira pas au minimum. Nous ajouterons que l'épaisseur de la couche de vernis à travers laquelle se font le rayonnement et la réflexion est très-petite; cette épaisseur est encore moindre pour les corps métalli-

ques; ainsi, une portion concave de sphère en bois, recouverte d'une feuille métallique, réfléchit la chaleur avec la même facilité qu'un miroir métallique massif qui aurait le même poli.

M. le comte de Rumford est arrivé aux mêmes résultats par des méthodes un peu différentes. (*Mémoires sur la chaleur.*)

167. A chaque instant une foule de faits analogues aux précédens s'offrent à nous dans la vie commune. Ainsi, les vases bien polis s'échauffent et se refroidissent lentement; c'est le contraire pour les vases rouillés ou noircis par l'usage; les vêtemens noirs, dont les pouvoirs absorbans et les pouvoirs émissifs sont considérables, sont chauds en été et froids en hiver, et les vêtemens blancs, par une raison contraire, sont avantageux dans toutes les saisons.

168. Reprenons maintenant plusieurs points de la théorie de la chaleur rayonnante, dont l'examen nous conduira à une explication claire et rigoureuse de la formation de la rosée et d'autres phénomènes analogues.

1°. Si un thermomètre infiniment petit m, placé dans une enceinte, a acquis une température fixe; et que l'on place un écran FF' (*fig.* 101) dont la température est la même que celle de la portion correspondante CC' de l'enceinte, le thermomètre conservera sa température; car il recevra de cette surface autant de chaleur qu'il en recevrait de la partie cachée CC'. Il est visible qu'il n'en serait plus de même, si l'écran FF' était plus échauffé ou moins échauffé que la partie CC'. Dans le premier cas, le thermomètre s'échaufferait; dans le second cas, il se refroidirait. Ici

nous considérons la surface FF' comme entièrement privée de la propriété de réfléchir la chaleur. Supposons maintenant que la surface FF' réfléchisse toute la chaleur qu'elle reçoit; cette surface n'aura pas de température propre; il faudra lui attribuer la température de la portion HH' de l'enceinte dont la chaleur est réfléchie sur le thermomètre.

2°. Un thermomètre m, placé dans un espace vide d'air, terminé par une enceinte dont toutes les parties ont une température constante t, acquerra cette température. Si l'on place entre le thermomètre m et l'enceinte un plateau HH' (*fig.* 102) dont la température t' soit moindre que t, le thermomètre s'abaissera; car on remplace l'action de la partie CC' par celle de la surface HH' : si en outre on place un miroir KK' propre à réfléchir sur le thermomètre la chaleur qu'il reçoit du plateau HH', le thermomètre s'abaissera encore; en effet, ce miroir intercepte la chaleur envoyée par la portion de l'enceinte DD', et la remplace par une chaleur plus faible.

3°. Ajoutons encore un dernier cas : supposons toujours qu'un thermomètre m ait acquis dans une enceinte une température fixe, et qu'on dispose deux miroirs métalliques polis HH' et KK' et un corps A (*fig.* 103) dont la température soit moindre que celle de l'enceinte, le thermomètre m baissera. On fait cette expérience dans les cours en plaçant en A un matras rempli de neige. On avait d'abord cru voir dans cette expérience l'indication de l'existence des rayons frigorifiques; mais l'explication est aussi simple que celle des cas précédens. Le miroir HH' intercepte l'action d'une partie de l'enceinte DD', et

y substitue sa propre action. Or tous les rayons partis de *A* qui tombent sur le miroir *K K'*, sont réfléchis sur le miroir *H H'*, et ensuite sur le thermomètre *m*. Ainsi, la température qu'il faut attribuer au miroir *H H'*, est la température du corps *A*, de même l'autre miroir substitue la température du corps *A* à la température de la partie de l'enceinte qu'il intercepte.

Le raisonnement serait absolument le même si le corps *A* était plus échauffé que le thermomètre et l'enceinte.

M. Pierre Prevost, de Genève, a donné le premier l'explication des effets produits par la réflexion apparente du froid. Il a reconnu que les corps émettent leur chaleur rayonnante à toutes les températures, et qu'ils se l'envoient mutuellement, de même que les corps lumineux se communiquent leur lumière. (*Journal de phys.*, 1792. *Essais de phys. de* M. Pictet. *Observations sur la chaleur rayonnante. An. ch. et phys.*, 6.)

Nous avons supposé au thermomètre des dimensions infiniment petites; les explications seraient encore les mêmes si cet instrument avait des dimensions finies.

169. La chaleur que reçoit une surface des corps environnans, est en partie réfléchie. Chaque élément de cette surface peut être divisé en deux parties égales ou inégales, dont l'une est privée de toute réflexibilité, et dont l'autre est un miroir parfait. Le rapport de ces deux parties est un coëfficient dépendant de l'état de la surface, et que les observations ont donné sensiblement constant pour des intervalles de température peu étendus. Soit un rayon de chaleur, tombant sur une surface, d'une intensité représentée par *J*; il se partagera en deux parties, une partie *a r*

pénétrera dans le corps, et l'autre partie $(J - ar)$ sera réfléchie; le coëfficient a est un nombre fractionnaire qui exprime la réflexibilité de la surface. Si maintenant le même rayon r tendait à sortir du solide suivant une direction contraire, il serait décomposé en deux parties ar et $(J - ar)$, cette dernière partie serait rappelée vers l'intérieur. C'est là ce qui constitue l'égalité réciproque du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant. Cette considération qu'on doit à M. Fourier est indépendante de la valeur particulière de a.

De la Rosée.

170. Les physiciens n'avaient aucune idée juste sur la formation de la rosée avant la publication de l'ouvrage du docteur Wells, traduit de l'anglais par M. Aug. Tordeux (1). Parmi les différentes opinions émises sur la cause de ce phénomène, il y en avait une qui se présentait naturellement, et qui le faisait dépendre du refroidissement de l'air; mais cette explication avait contre elle plusieurs faits, et en particulier ce fait déjà connu du temps d'Aristote, que la rosée ne se dépose que pendant les nuits calmes et sereines, et de plus que tous les corps ne s'en couvrent pas également.

171. Même dans les nuits également calmes et sereines, la rosée ne se précipite pas toujours en égale quantité. Il paraît bien constaté qu'il ne s'en produit jamais sous les influences réunies du vent et d'un ciel couvert. Tout ce

(1) M. Arago en a donné un extrait étendu, avec des observations, dans les *Ann. ch. et phys.*, t. 5.

qui augmente l'humidité de l'air en favorise la production; la réunion des circonstances favorables au dépôt de la rosée se trouve plus souvent au printemps et surtout en automne qu'en été. En France, la rosée est abondante par les vents du sud et de l'ouest, qui viennent de la mer; c'est le contraire en Égypte. La rosée, sous un ciel pur, se forme pendant toute la durée de la nuit; elle est moins abondante entre le coucher du soleil et minuit qu'entre minuit et le lever. En général, tout ce qui tend à augmenter l'étendue de la portion du ciel qui peut être aperçue de la place qu'occupe le corps, augmente la quantité de rosée dont celui-ci se couvre. Ainsi 10 grains de laine, placés sous une planche, augmentent dans leur poids en une nuit de 9 grains, tandis qu'un égal poids de la même laine placé sur l'herbe, mais à découvert, se charge de 15 grains. On pourrait croire, d'après cette expérience, que la rosée tombe comme la pluie. On sera tout-à-fait détrompé si l'on place, comme l'a fait le docteur Wells, dans un cylindre de terre cuite, ouvert par ses deux bouts, 10 grains de la même laine, ils ne se chargeront que de 2 grains d'humidité.

Tous les métaux ne se couvrent pas également de rosée; on voit quelquefois le platine, le fer, l'acier, le zinc, le plomb, très-humides, tandis que l'or, l'argent, le cuivre et l'étain, placés dans les mêmes circonstances, se conservent parfaitement secs. L'état mécanique des corps influe sur la précipitation de la rosée. En général, la division augmente cette précipitation, ainsi, les copeaux menus s'humectent plus que le bois massif.

172. La température de l'herbe et de tous les corps

qui se couvrent de rosée est plus basse que celle de l'air environnant.

Le docteur Wells a observé que les thermomètres placés sur la terre marquent souvent dans les nuits calmes et sereines, 4°, 5°, 6°, et même 8 degrés de moins qu'un thermomètre semblable placé à 4 pieds au-dessus du sol. On peut remarquer cette différence dès le coucher du soleil; elle persiste jusqu'après son lever. Pendant les nuits très-sombres elle n'est pas observée.

Si pendant une nuit sereine, un nuage passe au zénith, la température de l'herbe monte aussitôt. Dans une belle nuit, le docteur Wells trouva que l'herbe, dont la température était de 6°,7 au-dessous de celle de l'air, monta tout-à-coup de 5°,6 par la présence d'un nuage; dans la même circonstance, la température de l'air n'avait pas changé sensiblement.

La température des métaux descend rarement de 1° à 2° au-dessous de celle de l'air ambiant.

Théorie de la formation de la Rosée.

173. L'exposé précédent fait connaître exactement quelles sont les circonstances qui accompagnent la formation de la rosée. Il résulte des expériences précises et variées de M. le docteur Wells, que le refroidissement des corps précède toujours l'apparition de la rosée; de sorte qu'il faut admettre que la rosée est la *conséquence*, et non la cause du refroidissement des corps sur lesquels elle se dépose. S'il n'en était pas ainsi, tous les corps devraient s'en couvrir et se refroidir également. Or, l'observation apprend, comme nous l'avons vu, que la température des

métaux ne s'abaisse que de 2 degrés au-dessous de celle de l'atmosphère, tandis que l'abaissement de la température de l'air, du papier, du verre, va quelquefois jusqu'à 8 degrés.

Maintenant, quelle est la cause de ce refroidissement inégal? C'est, d'après M. Wells, le rayonnement de la chaleur; en effet les corps dont la faculté rayonnante est grande, se refroidissent considérablement : tels sont le verre, le papier, les matières organiques. De plus, toutes les circonstances qui tendent à rendre le rayonnement considérable, augmentent le froid partiel, et par suite le dépôt de rosée : ainsi, sous un ciel pur, la chaleur lancée vers les régions supérieures, se perd dans l'espace, et la rosée se forme en abondance; sous un ciel couvert, les nuages compensent, par leur rayonnement propre et par leur réflexion, la chaleur perdue par les corps placés à la surface de la terre, et s'opposent par cela même à la formation de la rosée. C'est par une raison semblable qu'il ne se dépose pas de rosée, ni sous les arbres, ni près des édifices.

On conçoit encore facilement pourquoi les vents qui s'élèvent pendant la formation de la rosée en arrêtent ou en retardent les progrès; ils amènent de nouvelles couches d'air chaud, qui cèdent aux corps terrestres une portion de leur chaleur propre et les empêchent de se refroidir; de plus, le renouvellement de l'air accélérant l'évaporation, doit encore être contraire à la formation de la rosée, parce que s'il s'en était déposé, elle serait emportée par l'air chaud.

Phénomènes qui ont du rapport avec la Rosée.

174. Nous parlerons de plusieurs faits découverts par M. Benedict Prevost, et dont M. Pierre Prevost a donné l'explication d'après sa théorie ingénieuse du rayonnement de la chaleur.

Tout le monde a remarqué que lorsque l'air extérieur se refroidit la nuit, les vitres des fenêtres se couvrent d'humidité intérieurement, et que le contraire arrive si l'air du dehors est devenu plus chaud que celui de l'intérieur. Voici maintenant ce qu'a observé M. Prevost. Si l'on colle sur la face du côté de l'air froid de l'un des carreaux une lame de métal poli, il ne se déposera que peu ou point d'humidité sur la partie du carreau en contact avec l'air chaud, correspondant à l'armure métallique, tandis que le reste sera couvert de rosée. La lame métallique placée sur la face contiguë à l'air froid, réfléchit vers l'air chaud intérieur toute la chaleur qui tend à sortir, et empêche ainsi le carreau de verre de se refroidir. L'humidité doit donc moins s'y déposer que partout ailleurs. Si la lame métallique est placée sur la face contiguë à l'air chaud, l'humidité ne se montrera nulle part en plus grande abondance que sur la portion du carreau qu'elle couvre. Elle repousse dans l'intérieur toute la chaleur rayonnante qui tendrait à s'introduire de ce côté dans le verre, et dont l'effet serait de maintenir sa température, tandis qu'elle n'empêche pas l'autre face de se refroidir par la voie du rayonnement et de la communication. Si les deux masses d'air conservent long-temps leur température actuelle,

l'effet de la communication l'emporte sur celui du rayonnement, et l'humidité se dépose partout.

175. Beaucoup de personnes ont pu remarquer que le froid qu'on éprouve en hiver est plus vif le soir que pendant le jour, par un temps serein que par un ciel couvert de nuages; l'explication de ce phénomène rentre dans l'explication donnée plus haut pour la rosée; il est encore tout simple que le froid soit moins grand sous un abri quelconque, sous un arbre, sous un parapluie, qu'à l'air libre.

176. On trouve encore dans la théorie du rayonnement de la chaleur l'explication de cet usage ancien chez les jardiniers de défendre les pêchers, les abricotiers et d'autres plantes délicates, de l'action du froid, en les couvrant d'une natte mince. M. le docteur Wells a fait des expériences directes qui montrent bien que la théorie de la rosée eût indiqué ce moyen s'il n'était pas établi par un long usage. Ainsi un thermomètre placé sous un mouchoir fixé à quelques pieds de hauteur sur des bâtons, marquait 3 à 4 degrés de plus que l'air libre; c'est de la même manière que les arbres élevés défendent les vignes dans les hivers rigoureux.

177. On forme artificiellement de la glace au Bengale pendant des nuits où la température de l'air est supérieure à zéro. On pratique à cet effet des excavations carrées de 30 pieds de côté et de deux pieds de profondeur; on couvre le fond d'une couche de cannes à sucre ou de tiges de maïs; on place ensuite sur cette couche des piles de terrines non vernissées épaisses de $\frac{1}{4}$ de pouce, profondes de 1 pouce $\frac{1}{4}$, et remplies d'eau. La porosité de ces vases

permet à l'eau de suinter légèrement à travers les parois. En général, on a remarqué qu'il ne se produit beaucoup de glace que pendant un air calme, et sous un ciel pur. D'après M. Williams, l'eau dans ces circonstances gèle quand la température de la paille qui environne les pots est à 2 et même à 5°,6 au-dessus de zéro.

178. C'est à tort que sir R. Barke, M. Williams et tous les auteurs qui ont parlé de ce moyen artificiel de faire de la glace, l'expliquent par le froid produit dans l'évaporation; car il est constaté, 1° que le vent qui favorise l'évaporation est contraire au succès de l'opération; 2° que la glace se forme en grande quantité dans les nuits mêmes où la rosée est très-abondante, et qu'il y a contradiction de supposer que d'une part l'air se charge d'humidité, et que de l'autre il en abandonne; 3° qu'en admettant que l'évaporation soit la cause du phénomène, comment concevoir que la lame de glace augmente d'épaisseur? 4° que la congélation artificielle n'a jamais lieu dans les circonstances qui ne sont pas favorables au rayonnement, par exemple, sous un ciel obscur; enfin, dans plusieurs expériences, on a reconnu que la glace pesait plus que l'eau employée.

179. Nous ne quitterons pas le sujet du calorique rayonnant sans mentionner une expérience curieuse de M. Wollaston. Supposons qu'un thermomètre *m*, exposé le soir à l'air libre, sous un ciel serein, soit parvenu à une température fixe; si l'on interpose un miroir métallique très-poli, dont la concavité soit tournée vers le ciel, et dont le thermomètre occupe le foyer, à l'instant l'équilibre cessera d'avoir lieu (*fig.* 104). C'est une expérience

analogue à celle que nous avons citée relativement à la réflexion apparente du froid. Le miroir qui intercepte le rayonnement de la terre réfléchit sur le thermomètre les rayons plus froids des régions supérieures de l'air. En faisant cette expérience, on remarque que la présence d'un nuage au zénith fait quelquefois monter le thermomètre de plusieurs degrés. Le succès de cette expérience exige le concours de plusieurs circonstances qui ne se trouvent pas toujours réunies. Il serait incertain si les corps inférieurs étaient très-froids à leur superficie, si la loi du décroissement de la température de l'air était interrompue, ce qui arrive souvent, enfin si la réflexibilité du miroir concave était imparfaite. Cette expérience offre un grand intérêt, en ce qu'elle confirme les résultats découverts par M. le docteur Wells.

Propagation de la chaleur dans l'intérieur des corps. — Loi de cette propagation. — Détermination de la conductibilité intérieure.

180. Dans le chapitre précédent nous avons considéré la communication de la chaleur par voie de rayonnement à distance. Nous nous occuperons de la communication au contact. Les corps diffèrent autant par leur propriété de conduire la chaleur, que par leurs autres propriétés. Avant de faire connaître les *conductibilités* ou mieux *conductibilités particulières*, nous indiquerons la loi générale que présente la propagation de la chaleur dans une barre métallique.

Soit une barre semblable exposée par une de ses extrémités à l'action constante d'un foyer. Partageons cette

barre en un grand nombre de sections transversales; la section la plus voisine du foyer en prendra d'abord la température; la seconde section recevra sa chaleur de la première, et ainsi de suite; de sorte que si la barre est percée de trous assez grands pour contenir des réservoirs de thermomètres, on verra ces instrumens monter successivement. Si nous considérons trois élémens A, A', A'', très-voisins, l'élément intermédiaire A' recevra de la chaleur de l'élément A le plus rapproché de la source et en communiquera à l'élément suivant A''; ainsi, d'après la loi indiquée (n° 155), l'élément A' recevra de l'élément A qui le précède, une quantité de chaleur proportionnelle à l'excès de la température de A sur celle de A', et perdra une quantité de chaleur proportionnelle à l'excès de sa température sur celle de A''.

Il est visible, d'après cela, que si la barre n'éprouvait aucune déperdition de chaleur, *chaque thermomètre monterait graduellement jusqu'à ce qu'il eût atteint la température du foyer*. Mais il n'en est pas ainsi; la perte de chaleur a toujours lieu, et par le rayonnement, et par le contact du milieu. Les thermomètres montent nécessairement moins vite que dans la supposition d'une perte nulle, et n'atteignent jamais la température du foyer; ils s'arrêtent lorsque la quantité de chaleur reçue par chaque section est égale à celle que cette même section perd par le rayonnement et par le contact de l'air. Alors l'état thermométrique de la barre est devenu stationnaire, et la température de tous les thermomètres va en diminuant depuis l'extrémité en contact avec le foyer jusqu'à l'autre extrémité. *Les températures forment une série exponentielle décroissante, si les distances du foyer croissent en pro-*

gression arithmétique. La formule est $y = a^{-\varphi}$; φ étant la distance d'un thermomètre au foyer, y l'excès de sa température sur celle de l'espace environnant.

181. Cette loi a été donnée pour la première fois par Lambert de l'académie de Berlin (*pyromètrie*) ; MM. de Rumford et Biot l'ont confirmée par des expériences (1).

Je rapporterai une expérience tirée de mon mémoire sur la conductibilité, qui mettra bien cette loi sous les yeux du lecteur. (*Ann. de ch. et de phys.*, t. 19.)

L'expérience est faite avec une barre de cuivre carrée ; le côté du carré est de 21^{mm} ; les thermomètres sont distans de 10 centimètres. Le diamètre des trous dans lesquels sont les thermomètres est de 6^{mm} ; ils sont percés jusqu'aux $\frac{2}{3}$ de l'épaisseur de la barre. La barre est échauffée par le moyen d'un quinquet. L'emploi du quinquet présente plusieurs avantages ; on le gouverne facilement, et il ne porte que peu de chaleur dans le lieu des observations. La température de l'air environnant est indiquée par un thermomètre très-sensible. On parvient à rendre cette température sensiblement constante, condition nécessaire pour que l'expérience soit exacte. La durée de l'expérience est de six heures environ. Il faut deux à trois

(1) Il faut remarquer que l'expression de la loi contient le seul terme $a^{-\varphi}$ lorsque la barre est supposée infinie. Dans le cas général, l'expression est formée de deux exponentielles. La série décroissante des températures n'est pas une suite géométrique pour laquelle le quotient de deux termes consécutifs demeure constant. Elle est une suite récurrente. Si l'on considère trois termes consécutifs, et si l'on divise la somme des deux termes extrêmes par le terme moyen, le quotient est le même dans toute l'étendue de la barre.

heures pour que les thermomètres aient acquis l'état stationnaire (*fig.* 105).

RÉSULTATS.

Thermomètres.	Température.	Excès sur la température de l'air.	Quotient de la somme de deux excès par l'excès intermédiaire.
1er	83°,44	66°,36	
2e	65°,38	46°,28	2,14
3e	49°,70	32°,62	2,15
4e	41°,40	24°,32	2,11
5e	35°,71	18°,63	2,17
6e	33°,26	16°,18	

La température de l'air est égale à 17°,08.

La distance entre deux thermomètres consécutifs étant de 10 centimètres, leurs distances au foyer de chaleur sont en progression arithmétique; les excès de leurs températures sur celle de l'air forment une série géométrique, car *le quotient de deux termes consécutifs est constant*, comme on le voit dans la troisième colonne du tableau $\frac{66,36}{46,28} = 1,4$; $\frac{46,28}{32,62} = 1,4$; $\frac{32,62}{24,32} = 1,4$; et ainsi de suite. *Le quotient de la somme de deux excès, par l'excès intermédiaire, est également constant*, comme le montre la quatrième colonne. 2,14 est le quotient de 66,36 + 32,62 par l'excès intermédiaire 46,28; 2,15 est le quotient de 46,28 + 24,32 par 32,82, et ainsi de suite (1).

(1) Soient y, y', y'' les excès de trois thermomètres consécutifs, $x - h$, x, $x + h$ leurs distances à la source de chaleur. On aura, si la longueur de la barre est supposée infinie, $y = a^{-(x-h)}$, $y' = a^{-x}$, $y'' = a^{-(x+h)}$; d'où l'on tire $\frac{y}{y'} = \frac{y'}{y''} = a^{h}$. De même $\frac{y+y''}{y'} = a^{h} + a^{-h}$; h étant l'intervalle compris entre deux thermomètres consécutifs : a^{h} et $a^{h} + a^{-h}$ sont évidemment constans.

Pour un quatrième thermomètre on aurait aussi $\frac{y+y''}{y''} = a^{h} + a^{-h}$.

Si les excès de température étaient beaucoup plus considérables, la série exponentielle serait altérée.

Ce sont là les conséquences principales de la loi de la propagation de la chaleur, dans une barre prismatique.

182. La propagation de la chaleur varie avec les dimensions des corps; la perte de la chaleur étant proportionnelle à l'aire des surfaces extérieures, le décroissement des températures est d'autant plus considérable, que le contour est moindre; et, si l'on cherche pour deux barres de la même substance, différentes en épaisseur, les distances du foyer aux deux points, où la température est la même, on trouve *qu'elles sont comme les racines carrées des épaisseurs.* Voilà pourquoi on tient dans la main, sans se brûler, un fil métallique, à quelques pouces du point où il est chauffé au rouge.

Ceux qui voudraient connaître la théorie de la propagation de la chaleur dans toute son étendue, et la théorie mathématique de la chaleur rayonnante, devraient consulter l'ouvrage de M. Fourier.

183. Je citerai quelques autres expériences. Les barres ont les mêmes dimensions que celle de cuivre; on les avait couvertes d'un même vernis, afin de leur donner la même surface rayonnante.

Barre de fer. Température de l'air = 13°,02.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	75°,92	62°,90	
2e	49°,71	36°,69	2,54
3e	33°,64	20°,52	2,34
4e	25°,34	12°,32	2,33
5e	21°,21	8°,19	2,31
6e	19°,63	6°,61	

Barre d'étain. Température de l'air = 17°,34.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	80°,75	63°,41	
2e	52°,51	35°,17	2,42
3e	38°,86	21°,52	2,36
4e	32°,86	15°,52	

Barre de zinc. Température de l'air = 5°,62.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	69°,79	64°,17	
2e	43°,64	38°,02	2,35
3e	31°,05	25°,43	2,20
4e	23°,55	17°,93	

Barre de plomb. Température de l'air = 17°,12.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	82°,25	65°,13	
2e	46°,54	29°,42	2,72
3e	32°,05	14°,93	2,64
4e	27°,11	9°,99	-

184. La série des températures n'est représentée par une suite exponentielle que pour les substances qui jouissent de la propriété conductrice à un haut degré, et qui présentent une homogénéité parfaite. Ainsi le plomb, qui conduit la chaleur cinq fois moins bien que le cuivre, donne des résultats qui s'écartent déjà de ceux qui formeraient une suite géométrique. Les quotiens que fournit l'expérience relative au plomb sont $\frac{65,13}{29,42} = 2,21$; $\frac{29,42}{14,93} = 1,97$; $\frac{14,93}{9,99} = 1,49$.

Pour qu'on ait une idée du décroissement de la température dans les barres formées par des substances peu

conductrices, je rapporterai une expérience faite avec une barre de marbre. Je mettrai à côté une autre expérience faite avec une barre de fer, qui avait sensiblement les mêmes dimensions que celle de marbre. Chaque côté du carré de la barre de fer était de 26^{mm}; le côté de la barre de marbre était de 26^{mm},45.

RÉSULTATS.

Marbre blanc. Température de l'air = 17°,15.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	81°,06	63°,91	
2e	23°,83	6°,68	10,83
3e	19°,16	1°,95	3,87
4e	18°,62	1°,47	

Barre de fer. Température de l'air = 22°,92.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	87°,04	64°,12	
2e	57°,28	34°,71	2,42
3e	42°,63	19°,71	2,40
4e	35°,44	12°,52	

Les excès des températures de la barre de marbre n'ont aucun rapport avec une suite géométrique.

185. Cherchons actuellement les pouvoirs conducteurs; on peut les déduire des expériences précédentes. Pour cela, il faut qu'on connaisse les relations qui existent dans l'état stationnaire entre la conductibilité, les dimensions d'une barre, et les excès des températures de trois points également distans. Nous ne rapporterons pas ici ces formules, on les trouvera dans les additions.

Substances.	Nombres proportionnels à la propriété conductrice.
Or	1000
Platine	
Argent	973,0

Cuivre	898,2
Fer	374,3
Zinc	363,0
Étain	303,9
Plomb	179,6
Marbre	23,6
Porcelaine	12,2
Terre des fourneaux	11,4

186. Ingenhouz cherchait les conductibilités (*Journ. de phys.*, 1789) en recouvrant de cire un cylindre de chaque métal, et exposant de suite tous ces cylindres à un même foyer. Les pouvoirs conducteurs étaient d'autant plus grands que la partie sur laquelle la cire avait fondu était plus étendue. D'après ces expériences, l'ordre des conductibilités serait le suivant : *argent, or, cuivre* et *étain*, à peu près également conducteurs; *platine, fer, acier, plomb*, beaucoup moins conducteurs que les autres.

187. La grande différence qui existe entre les pouvoirs conducteurs des métaux et des terres n'a pu long-temps échapper à l'observation; mais avant les expériences dont les résultats sont rapportés dans le n° 184, on ne s'était pas occupé de ce sujet avec beaucoup de suite. Nous désirons que nos expériences soient confirmées par des expériences ultérieures.

188. En général, *les métaux sont de bons conducteurs; les oxides, les pierres, la porcelaine, les terres, le bois*, sont de très-mauvais conducteurs; *le bois* est un conducteur tellement imparfait que, dans une expérience où je voulais comparer sa propriété conductrice à celle du fer, *je l'ai brûlé à une de ses extrémités, sans pouvoir l'échauffer à quelques pouces de distance*. Le prisme soumis à l'expérience avait les dimensions de la barre de cuivre dont il a été question plus haut.

De la conductibilité des Fluides.

189. La manière ordinaire de chauffer les liquides n'est nullement propre à faire juger si les corps possèdent la propriété conductrice; la grande facilité avec laquelle l'uniformité de température s'établit, pourrait être attribuée au transport des molécules. En effet, les molécules inférieures, étant chauffées d'abord, deviennent plus légères et montent en vertu de leur légèreté; les molécules de la surface, plus froides et conséquemment plus denses, tombent dans le fond du vase, de sorte que, même dans la supposition d'une conductibilité nulle, les mouvemens intérieurs suffiraient pour faire concevoir la facile distribution de la chaleur. L'existence de ces courans se démontre par une expérience très-simple. Qu'on remplisse d'eau ordinaire un grand ballon; qu'on y jette un peu de sciure de bois de chêne, et qu'on place ce ballon sur un foyer, bientôt l'on verra les parcelles de bois, emportées par les courans, descendre et monter rapidement. Plusieurs physiciens, et notamment le comte de Rumford, ont nié la propriété conductrice des liquides. Ce savant a fondé son opinion sur plusieurs expériences ingénieuses. Ainsi, il a remarqué qu'un cylindre de fer, chauffé à 100 degrés, était porté dans l'eau et dans le mercure qui recouvrait un mamelon de glace, sans en fondre la plus petite partie; et en général il pense que la chaleur ne pénètre pas dans un liquide en repos, quand il est échauffé par la partie supérieure.

190. M. Nicholson a fait, conjointement avec M. Pictet, des expériences par lesquelles il a pu s'assurer qu'en échauffant un liquide à sa surface, par la superposition

d'un disque métallique chaud, la chaleur pénétrait et faisait monter le thermomètre placé au fond du liquide. Le liquide était contenu dans un vase d'une matière peu conductrice, afin d'éviter la communication par les parois. Il résulte de ces expériences que la pénétration de la chaleur de haut en bas a été cinq fois plus lente dans l'huile que dans le mercure. Murrai a opposé à l'opinion du comte de Rumford des expériences encore plus directes et plus concluantes. Il a placé la boule d'un thermomètre dans le fond d'un cylindre de glace qu'il a rempli alternativement d'huile et de mercure; puis il a approché un corps chaud de la surface du liquide. Le thermomètre est monté, dans l'une et l'autre épreuve, de plusieurs degrés. La communication ne pouvait pas être attribuée au vase, puisque la glace devait l'absorber, et non la propager; d'une autre part, les molécules, plus chaudes et plus légères de la surface, ne pouvaient pas établir de courant. Il faut donc que la chaleur se soit communiquée au thermomètre sans le secours des courans et du vase. Ces expériences constatent en même temps que le mercure est un conducteur de chaleur plus efficace que l'huile.

191. Il est encore plus difficile de montrer la conductibilité des gaz que celle des liquides, à cause de la prodigieuse mobilité de leurs particules. Ce qui paraît faire croire que la facilité du mouvement des particules contribue à donner aux gaz la faculté de conduire la chaleur, c'est que quand on gêne les mouvemens de l'air par le moyen des corps légers, des plumes, de la laine, on les rend mauvais conducteurs. C'est ainsi qu'on fait les couvertures d'édredon. Quoi qu'il en soit, quand les molécules des gaz ne sont pas gênées, elles transmettent la chaleur rapidement.

Ainsi, M. Pictet n'a pu observer une seconde de différence entre l'élévation d'un thermomètre à air et l'émanation de la chaleur d'un corps placé à distance. On a également observé que les aérostats éprouvent une soudaine dilatation à l'apparition du soleil.

Des Densités.

192. Nous avons déjà vu (n° 7) qu'on appelle pesanteur ou gravité la force qui précipite les corps vers le centre de la terre, et que l'action de cette force s'exerce sur toutes les parties de la matière dans des directions perpendiculaires à cette surface.

Ainsi un corps pesant est un assemblage de points matériels auxquels sont appliquées des forces égales et parallèles.

La résultante de toutes les forces est parallèle à leur direction commune; c'est le poids du corps.

Le poids d'un corps *homogène* est indépendant de sa forme et proportionnel à son volume. Deux corps de même nature sont égaux en poids sous le même volume, de sorte qu'étant placés dans les deux plateaux d'une balance, ils doivent s'y faire équilibre; ce qui est confirmé par l'expérience.

Les corps hétérogènes n'ont pas le même poids sous le même volume, et nous considérons ces corps comme ne renfermant pas la même quantité de matière sous des volumes égaux.

On dit que des corps sont plus ou moins denses, selon qu'ils renferment, à égal volume, plus ou moins de particules matérielles, également pesantes. Il en résulte que

la *densité* relative de deux corps n'est autre chose que le rapport de leur poids sous un même volume.

193. Le poids d'un corps varie d'un lieu à un autre (n° 27). La balance ne peut pas faire connaître cette variation, parce que les poids de tous les corps croissent ou décroissent dans le même rapport. Si P représente le poids d'un corps, V son volume, D sa densité, g la gravité du lieu où l'on considère le poids, on aura

$$P = V\ D\ g.$$

Nous remarquerons que les lettres P, V, D, g représentent des nombres abstraits. Ainsi, V est le nombre d'unités cubiques que renferme le volume du corps, D le rapport numérique de sa densité à celle du liquide prise pour unité. La pesanteur g est également rapportée à la pesanteur d'un lieu déterminé, prise pour unité. P désigne le nombre d'unités de poids rapportées à ce dernier lieu.

C'est à l'eau, portée à 3°,92, température de son maximum de densité, qu'on rapporte les densités des solides et des liquides. L'air, à 0° de température et à $0^m,76$ de pression, sert de terme de comparaison pour les fluides élastiques permanens ou non permanens. On a préféré l'air à tout autre gaz, parce qu'il est de même nature dans tous les climats et dans toutes les saisons.

Nous parlerons des pesanteurs spécifiques des gaz, de celles des liquides et des solides, des aéromètres, des aérostats, et de la détermination du maximum de densité.

Densité des Gaz.

194. Le procédé employé pour la détermination de la densité des gaz est extrêmement simple. Il consiste à pe-

ser un ballon de huit à dix litres, vide et successivement plein d'air et de différens gaz.

Ce ballon doit être fermé par un robinet très-bien travaillé, afin de bien conserver le vide. Il est indispensable d'opérer sur un volume un peu considérable, à cause de la légèreté des gaz. Si la capacité du ballon n'était que d'un à deux litres, les erreurs auraient trop d'influence sur les résultats.

Comme il n'est jamais possible de faire le vide au-delà d'un millimètre, il est bon, après l'introduction de l'air sec ou d'un autre gaz, de faire de nouveau le vide; on est certain, par ce moyen, de ne pas y laisser d'air atmosphérique.

Quand on opère sur l'air atmosphérique, il n'y a d'autre précaution à prendre que de le dessécher.

Quand on opère sur un autre gaz, il est nécessaire de plus qu'il soit renfermé dans des cloches. Est-il peu soluble, comme l'oxygène, l'hydrogène, l'azote? on le conserve sur l'eau, quoiqu'il soit plus exact d'opérer sur le mercure. Est-il soluble, comme l'acide sulfureux, l'acide hydrochlorique, le gaz ammoniacal? il est recueilli sur le mercure.

La figure 106 indique la disposition de l'appareil. *M* est le ballon vide. *B* est la cloche qui reçoit le gaz, *C D* est le tube; ce tube est rempli de chlorure de calcium sur lequel passe le gaz. Celui-ci est d'abord introduit dans la cloche, ensuite les robinets *R* et *R'* étant ouverts, il pénètre de la cloche dans le ballon. On fait arriver de nouveau gaz jusqu'à ce que le niveau reste le même tant dans l'intérieur de la cloche qu'à l'extérieur, afin que la pression du gaz soit la même dans l'intérieur et à l'extérieur.

Soit p le poids du ballon vide, P le poids du ballon rempli d'air, $P-p$ sera le poids de l'air contenu. La même expérience, faite avec un autre gaz, donnera $P'-p$ pour le poids de ce gaz; et, comme les densités sont proportionnelles aux poids sous le même volume, on aura, en prenant la densité de l'air pour unité, la proportion

$$1 : d :: P-p : P'-p, \text{ d'où } d=\frac{P'-p}{P-p}.$$

195. Indiquons les moyens de ramener les résultats des expériences à la température de la glace fondante et à la pression moyenne $0^m,76$ de l'atmosphère.

L'élévation de température tend à diminuer la densité du gaz et à augmenter la capacité du ballon; la pression exerce aussi une grande influence, puisque nous avons vu que les poids d'un même volume, d'un gaz quelconque, sont proportionnels aux pressions (loi de Mariotte, n°108).

Supposons que pour un gaz quelconque nous ayons trouvé un poids p à la température de 15°,5 et à la pression $0^m,75$. Pour rendre le calcul plus court, représentons 15°,5 par t, et $0^m,75$ par h. D'après la loi de la proportionnalité des poids aux pressions, nous aurons

$$P : X :: h : 0,76, \text{ d'où } X=\frac{p \times 0,76}{h};$$

X est le poids corrigé de la pression : pour le corriger de la température, rappelons-nous qu'un volume d'un gaz à zéro étant 1, devient $1+at$ à la température t (a étant égal à 0,00375). En conséquence le poids du gaz à la température t, doit être au poids à zéro comme $1 : 1+at$. D'où il suit qu'il faut multiplier le poids trouvé par $1+at$. ainsi $X(1+at)$ est le poids à zéro, et à $0^m,76$ de pression.

Il ne reste plus qu'à faire la correction de la variation

du volume du gaz par l'effet du changement de la température du vase qui le renferme. L'élévation de la température du vase le dilate, agrandit sa capacité dans le rapport de 1 à $1 + kt$. k est ici le coëfficient de la dilatation du verre pour un degré. Le poids corrigé de la température et de la pression sera donc $\frac{P \times 0,76 \times (1 + at)}{h(1 + kt)}$. Comme souvent la variation de température est faible, et comme d'ailleurs le verre est peu dilatable, on néglige la dilatation du ballon. C'est ainsi qu'on a obtenu les densités des gaz solubles et des gaz insolubles.

196. MM. Arago et Biot ont déterminé avec une très-grande précision le poids d'un litre d'air sous la latitude 45°, à la pression $0^m,76$ et à la température de la glace fondante. La capacité du ballon, dans leurs expériences, était de $5^{lit.},5814$. Le poids de l'air contenu à zéro et $0^m,76$ était de $7^g,2532$. D'où l'on trouve $1^g,2995$ pour le poids d'un litre d'air. Ce qui conduit à $\frac{1}{769}$ pour la densité de l'air rapportée à celle de l'eau prise à la température de zéro. Si l'on compare les densités de l'air et des gaz à celle de l'eau prise au maximum de densité, on aura un résultat un peu différent. Un centimètre cubique d'eau distillée pèse un gramme à 3°,92, en portant un centimètre cubique d'air à 3°,92, on a $0^g,001283$, d'où l'on déduit $\frac{1}{779}$, pour le rapport précédent.

Des Aérostats.

197. Lana vers le milieu du dix-septième siècle, et Gallien vers le milieu du dix-huitième siècle, imaginèrent différens moyens de s'élever dans l'air; mais ces moyens,

qu'il serait superflu de relater ici, n'étaient pas fondés sur des données certaines, ils ne furent jamais mis à exécution.

La belle découverte des aérostats a été faite par Montgolfier; il lança le premier ballon à Annonay en 1782. Son ballon avait 36 pied de diamètre; l'enveloppe était de papier; il était rempli d'air atmosphérique raréfié par le moyen d'un fourneau placé sous le ballon. Pilastre Desrosiers et Darlandes osèrent bientôt s'élancer dans les airs en entretenant eux-mêmes le feu du fourneau.

M. Charles, réfléchissant à tous les dangers attachés aux montgolfières, eut l'heureuse idée de substituer l'hydrogène à l'air dilaté, dont la densité est 14 ou 15 fois moindre que celle de l'air.

Charles et Robert s'élevèrent dans un ballon de 26 pieds de diamètre, et parcoururent un espace de neuf lieues avant de descendre. A peine M. Charles eut-il porté les aérostats à ce haut degré de perfection où ils sont aujourd'hui, que l'on espéra les faire servir à la prospérité publique; on les employa à la guerre. M. Biot et Gay-Lussac, d'après le vœu de l'Institut, entreprirent un voyage aérostatique dont le but était de rechercher la loi du décroissement des forces magnétiques du globe à de grandes distances; ils s'élevèrent ainsi à 4000 mètres. M. Gay-Lussac s'éleva seul à une hauteur de 6636 mètres.

Pour concevoir la théorie des aérostats, qu'on imagine d'abord un volume de gaz hydrogène renfermé dans une enveloppe sans pesanteur; ce volume sollicité par la pesanteur tend à descendre, mais d'une autre part est poussé en haut par une force égale au poids du volume d'air qu'il déplace diminué du poids du gaz. Il doit donc mon-

ter jusqu'à ce qu'il se trouve dans une couche d'air d'une densité égale à la sienne. On calcule facilement le poids que peut enlever un ballon d'un volume déterminé; par exemple, un ballon de 10 mètres de diamètre a un volume de 523,6 mètres cubiques; ce volume d'air à la pression $0^m,76$ et à zéro de température pèse $680^k,15$; le même volume d'hydrogène ne pèse que $16^k,23$. La différence est $633^k,92$, que le ballon est capable d'enlever et de soutenir.

On ne charge jamais le ballon autant que l'indique ce calcul, afin qu'il puisse monter.

Il y a dans la partie supérieure du ballon une soupape qui permet de faire sortir du gaz quand on veut descendre. Si au contraire on veut monter on jette du lest; ce lest est du sable contenu dans de petits sacs. Les aérostats à gaz hydrogène sont les seuls en usage aujourd'hui. Pilastre Desrosiers voulut combiner les aérostats à gaz hydrogène avec les montgolfières. C'était une combinaison bien dangereuse; aussi Pilastre Desrosiers périt-il victime de son invention.

On a fait beaucoup de tentatives pour diriger les ballons, mais jusqu'à présent on n'est parvenu à aucun résultat satisfaisant.

Densités des Liquides.

Ier Procédé.

198. Comme nous l'avons déjà dit, les densités des liquides sont rapportées à celle de l'eau. On obtient la densité d'un liquide, en pesant un flacon bouché à l'émeri, successivement plein d'air, d'eau et du liquide dont on désire connaître la densité.

Exemple :

Poids du flacon plein d'eau.	195g,578
vide d'eau.	128g,595
Poids de l'eau.	66g,983
Poids du même flacon, plein d'alcool.	181g,515
vide d'alcool..	128g,595
Poids de l'alcool.	52g,920

A cause de la grande différence qui existe entre la densité de l'air et celle des liquides les plus légers, on se dispense de faire le vide dans le flacon. En retranchant le poids du flacon vide de celui du flacon plein, on a le poids du liquide; mais, les densités étant proportionnelles aux poids sous le même volume, la densité de l'alcool est à celle de l'eau prise pour unité comme 52,920 : 66,983; ce qui donne 0,790 pour la densité de l'alcool.

On a toujours soin de plonger le flacon dans une même masse d'eau, entretenue à une température constante. Si la température variait, on ramènerait les résultats à une même température, comme on l'a fait pour les gaz. Il y a cette différence que chaque liquide se dilate d'une quantité particulière pour chaque degré du thermomètre, tandis que tous les gaz ont le même coëfficient de dilatation.

La variation de la pression est sans influence sensible sur la densité des liquides et des solides; on n'en tient pas compte.

L'expérience précédente a été faite à 15°,5. Pour avoir les résultats à zéro, il suffit de faire porter la correction sur les poids des liquides, en faisant attention que les

poids sont d'autant plus petits, que les liquides sont plus dilatés; de sorte que, si la température est représentée par t, que les coëfficiens de la dilatation de l'alcool et de l'eau soient a et e, les poids précédens deviendraient à zéro $52^g,920\ (1 + at)$ et $66^g,985\ (1 + et)$. On compare ordinairement les deux densités à la température des corps environnans.

199. Si l'on voulait tenir compte du poids de l'air contenu dans le flacon, il faudrait connaître la densité de ce fluide comparée à celle de l'eau. Soit p le poids du flacon plein d'air; soit P' le poids du flacon plein d'eau. La différence $P' - p$ sera le poids de la quantité d'eau qu'il renferme à la température de l'expérience, moins celui du volume d'air que l'eau a chassé. Si donc P est le véritable poids de l'eau contenue dans le flacon, a le rapport entre la densité de l'air et celle de l'eau, il est visible qu'on aura

$$P - Pa = P' - p, \text{ d'où } P = \frac{P' - p}{1 - a}.$$

C'est là le poids de l'eau qu'on trouverait, si le flacon était d'abord pesé vide. Cette remarque est faite seulement pour mettre le lecteur en état d'apprécier l'influence de l'air, mais comme le poids de ce fluide n'est que $\frac{1}{770}$ de celui de l'eau, on néglige toujours cette correction.

IIe Procédé.

200. Le deuxième procédé est fondé sur ce qu'un corps plongé dans un fluide, perd de son poids une quantité égale au poids du volume du fluide déplacé. Ce principe d'hydrostatique est connu sous le nom de principe d'Archimède. Ce grand géomètre l'a découvert en cherchant,

à l'invitation de Hiéron, roi de Syracuse, la composition d'une couronne d'or, par le moyen des densités.

Pour mettre ce procédé en pratique, on suspend par un fil très-fin un cube métallique au plateau d'une balance. On établit l'équilibre entre les deux plateaux, le cube étant suspendu dans l'air; on plonge ensuite successivement le cube toujours attaché au plateau, dans différens liquides; les poids qu'il faudra mettre à chaque opération, dans le plateau auquel est fixé le cube, exprimeront les pertes qu'il éprouve dans les différens liquides, ou les poids des volumes de ces liquides qu'il déplace; mais ces volumes sont égaux, puisque c'est toujours le même cube qu'on emploie; d'ailleurs on suppose que la température soit invariable, condition qu'on remplit aisément, en plaçant toujours le vase dans une même masse d'eau dont la température est rendue constante. On possède toutes les données nécessaires pour trouver les densités, car ces dernières sont proportionnelles au poids sous le même volume.

Exemples :

Un cube de platine du poids de 155^{g},252, plongé successivement dans l'eau, l'alcool, l'éther sulfurique et l'essence de térébenthine, éprouve les pertes suivantes :

Poids du platine dans l'air.	155^{g},252
dans l'eau. . . . . :	148^{g},860
Poids du volume d'eau déplacé.	7^{g},392
Platine dans l'air.	155^{g},252
dans l'alcool.	149^{g},390
Poids du volume d'alcool déplacé.	5^{g},862

Platine dans l'air.	155g,252
dans l'éther sulfurique.	149g,967
Poids du volume d'éther déplacé.	5g,285
Platine dans l'air.	155g,252
dans l'essence.	148g,886
Poids du volume d'essence déplacé.	6g,366

d'où l'on tire 1,00, 0,793, 0,715, 0,861 pour les densités de l'eau, de l'alcool, de l'éther et de l'essence de térébenthine.

Le premier procédé est plus souvent suivi. Cependant la comparaison des deux nombres trouvés pour la densité de l'alcool par les deux procédés prouve qu'ils sont susceptibles d'une égale précision; le premier, seulement, est plus commode dans beaucoup de circonstances, et particulièrement quand les liquides se détériorent par le contact de l'air atmosphérique.

Densités des Corps solides.

201. Le deuxième procédé, employé pour connaître les densités des liquides, peut être appliqué aux solides; il suffira de peser les différens corps dans l'air et dans l'eau; le poids dans l'air, divisé par la perte dans l'eau, donnera la densité rapportée à ce dernier liquide. Car la perte dans l'eau est le poids d'un volume de ce fluide égal à celui des corps.

Exemple.

Poids d'un fragment d'or dans l'air.	7g,821
dans l'eau.	7g,415
Perte dans l'eau.	0g,406

d'où la densité de l'or égale $\frac{7821}{406}$ ou 19,263.

On trouvera de la même manière, avec les données de l'article précédent, que la densité du platine est égale à 21,00.

202. Ce procédé réunit à l'avantage d'une grande précision celui de pouvoir être employé en grand; par exemple, s'agit-il d'avoir la densité d'une masse de fonte, de bronze, d'une feuille de tôle? pour y parvenir on pèsera le corps dans l'air; on le fixera ensuite au plateau d'une forte balance; on prendra son poids dans l'eau; le reste s'achèvera comme précédemment.

203. Le plus ordinairement on suit un procédé différent.

On pèse d'abord un flacon bouché à l'émery, plein d'eau distillée, de la capacité d'un à deux décilitres. Soit P ce poids; soit également p le poids du corps dans l'air. Si l'on introduit ce corps solide dans le flacon plein d'eau, il en chassera un volume du liquide égal au sien; et si l'on fait une troisième pesée, et que P' représente le poids du flacon contenant le corps solide, $P+p-P'$ sera évidemment le poids du volume d'eau déplacé, de sorte que $\frac{p}{P+p-P'}$ sera la densité du corps solide.

Exemple.

Poids du flacon plein d'eau.	183g,543
Poids d'un fragment d'argent dans l'air. . . .	22g,474
TOTAL.	206g,017
Poids du flacon contenant l'eau et le corps. .	203g,872
Poids de l'eau déplacée.	2g,145

On a donc $\frac{22,474}{2,145}$ ou 10,477 pour la densité de l'argent.

204. Si le corps était plus léger que l'eau, on en obtiendrait également la densité par ce procédé. Par exemple, supposons qu'un morceau de bois, pesant 1g,253 dans l'air, ait fait sortir du flacon 1g,847 d'eau, sa densité serait $\frac{1,253}{1,847}$ ou 0,678.

205. Ce procédé est surtout avantageux pour la détermination des densités des corps en poudre, comme le sable, le charbon, etc. Il faut avoir soin alors de placer le flacon renfermant l'eau et la poudre, sous la machine pneumatique, afin de faciliter, par le vide, le dégagement de l'air interposé.

206. Si la substance avait de l'action sur l'eau, si c'était, par exemple, un sel soluble, on prendrait sa densité par rapport à un liquide sur lequel il n'aurait pas d'action, et dont on connaîtrait la densité rapportée à celle de l'eau.

Des Aréomètres.

207. Les notions précédentes renferment tout ce qu'il importe de connaître pour la détermination des pesanteurs spécifiques. Nous ne devons pas cependant omettre de faire mention des aréomètres ou pèse-liqueurs, instrumens imaginés pour rendre l'opération plus prompte quand il s'agit des liquides. Le commerce des eaux-de-vie, des acides, etc., en exige l'emploi continuel.

208. Les aréomètres sont à volumes constans ou à volumes variables. La construction de ces instrumens est fon-

dée sur ce que, si un corps plonge dans un liquide et surnage en partie, le poids du volume déplacé égale le poids du corps entier (n° 44).

L'aréomètre de Farenheit est un aréomètre à volume constant. Il est représenté par la figure 107 : *C* est un plateau destiné à recevoir des poids; *D C* est une tige du diamètre d'une demi-ligne et de la longueur de quatre à six pouces; *D E* est un tube plus large; il peut avoir d'un à deux pouces de diamètre. L'instrument se termine par une boule *M*, qu'on remplit de mercure ou de plomb, afin que le centre de gravité, étant dans le point le plus bas, l'aréomètre soit dans un équilibre stable. Dans chaque expérience l'instrument plonge jusqu'au trait *b*. On l'a fait assez peu pesant pour que, plongé dans le liquide le plus léger, il ne s'enfonce pas jusqu'à ce point. On place dans le plateau supérieur des poids additionnels, qui réunis au poids de l'instrument, représentent celui du volume du liquide déplacé; et, comme le dernier est constant dans chaque expérience, on a tout ce qu'il faut pour connaître les densités. Supposons que l'instrument pèse P et qu'il faille ajouter p pour qu'il s'enfonce dans l'eau jusqu'en b; si on l'immerge dans un autre liquide et qu'il faille le poids p' pour qu'il s'arrête au même point b, il est visible que les densités des deux liquides seront dans le rapport de $P + p$ à $P + p'$; car dans chaque liquide le poids du volume déplacé est égal à celui de l'aréomètre augmenté de la masse additionnelle, et le volume immergé est toujours le même.

Application.

209. Un aréomètre, dont le poids est égal à $35^g,252$,

exige encore 25g,252 additionnels pour qu'il s'enfonce dans l'eau pure jusqu'au point marqué sur la tige.

Le même aréomètre avec son poids 35g,252, porté dans un autre liquide, exige 25g,174 de poids additionnel pour qu'il soit plongé jusqu'au même point.

La densité du second liquide, prise par rapport à l'eau, sera $\frac{60,426}{50,503} = 1,196$.

On emploie peu cet aréomètre aujourd'hui.

210. Nicholson a étendu l'usage de l'aréomètre de Fareinheit en adaptant un plateau à la partie inférieure. Cet aréomètre devient alors une petite balance hydrostatique, avec laquelle on peut prendre les densités des corps solides. Il suffit de les peser successivement dans l'air en les plaçant dans le plateau supérieur, et dans l'eau en les plaçant dans le bassin inférieur. Si le corps est plus léger que l'eau, on le fixe. Dans tous les cas, le poids du corps pris dans l'air, divisé par la perte dans l'eau, donnera la densité.

211. Les aréomètres à volume variable et à poids constant donnent immédiatement les densités sans le secours de poids. Il faut pour cela les graduer.

La forme de l'instrument est à peu près la même que celle de l'aréomètre de Farenheit, seulement la tige est moins fine; elle a 2 à 3 lignes de diamètre : tout l'instrument est en verre (*fig.* 108). Supposons que, plongé dans l'eau pure, il s'arrête en *D*, et que, plongé dans un liquide d'une densité double, il s'arrête en *B*; le volume de la tige *B D* sera évidemment la moitié du volume total *D B C* : si cette tige est sensiblement cylindrique en la divisant en dix parties égales, chacune de ces parties sera le dixième

du volume *B C*; mais, comme le poids de tout l'aréomètre est constant, les densités de divers liquides seront en raison inverse des volumes plongés. Le volume dans l'eau étant 20, les densités correspondantes aux divisions 10, 11, 12, 13, 14, etc., seront $\frac{20}{10}$, $\frac{20}{11}$, $\frac{20}{12}$, $\frac{20}{13}$, $\frac{20}{14}$, etc. L'aréomètre, ainsi gradué, donnera immédiatement les densités des liquides plus pesans que l'eau.

Si l'on veut connaître par le même moyen les densités des liquides plus légers, on s'arrange de manière que, dans l'eau distillée, la presque totalité de la tige soit hors de l'eau, comme le représente la figure 109. *A* est le point de l'eau distillée, *B* le point où s'arrête l'aréomètre plongé dans un liquide d'une densité moitié plus petite que celle de l'eau.

La tige *A B*, dont le volume est égal à celui de la partie *A C*, est divisée en parties égales. On écrit à côté de chaque division la densité correspondante, en commençant par *B*; elles seront successivement $\frac{10}{20}$, $\frac{11}{20}$, $\frac{12}{20}$, ... $\frac{20}{20}$.

212. Nous avons pris, pour rendre la graduation plus simple, les densités dans un rapport double, mais la graduation se ferait toujours de la même manière quand les densités auraient un rapport quelconque.

Cette graduation suppose le diamètre égal dans toute la longueur de la tige, condition qui est loin d'être remplie en général. Voici un procédé indépendant de cette supposition.

Supposons que l'aréomètre s'arrête dans l'eau distillée en *A* (*fig.* 110), et qu'on veuille écrire les densités sur la tige, rien ne serait plus simple si l'on avait des liquides de différentes densités; on y plongerait l'instrument et l'on noterait, à chaque immersion, la densité du liquide

sur la tige. Cette manière d'opérer exigerait un grand nombre de liquides, on peut cependant s'en passer; il suffit d'avoir de l'eau pure, des poids et une balance pour graduer un aréomètre avec une grande exactitude. En effet, supposons que l'aréomètre, plongé dans un liquide d'une densité plus grande que celle de l'eau, s'arrête en B; d'une autre part on pourrait alléger l'aréomètre de manière à le faire arrêter au même point B dans l'eau distillée; soit p le poids primitif de l'instrument quand il s'arrête en B dans le liquide dont la densité est d; soit x les poids dont il faut alléger l'aréomètre pour que dans l'eau il s'arrête au même point B. Dans les deux liquides, le volume déplacé est le même, les densités de ces liquides sont donc entre elles comme le poids de l'instrument.

On aura donc la proportion

$$p - x : p :: 1 : d, \text{ d'où } d = \frac{p}{p - x}.$$

Si l'on donne une valeur à d et qu'on tire x, on aura les poids qu'il faudra retrancher de l'aréomètre, pour qu'étant plongé dans l'eau pure, il s'arrête au même point auquel il s'arrêterait si, avec tout son poids, il était plongé dans le liquide de la densité d. En donnant à d diverses valeurs, depuis 2 jusqu'à 1, on aura tous les points de la tige correspondant à ces densités, et l'instrument sera gradué. Il faudra après cela rendre à l'aréomètre son poids primitif, le fermer à la lampe, et il sera propre à donner toutes les densités depuis 1 jusqu'à 2.

L'aréomètre ainsi gradué servirait à donner les densités des liquides plus pesans que l'eau; si l'on en désirait un qui pût servir pour les liquides plus légers, on suivrait absolument la même marche pour la graduation.

Soit $C\,D$ (*fig.* 111) un aréomètre qui dans l'eau pure s'arrête en D; plongé dans un liquide d'une densité moindre, il s'arrêtera en C. Si l'on augmente le poids de l'instrument, il pourra aussi s'enfoncer jusqu'en C dans l'eau distillée. Soit x le poids additionnel, soit p le poids primitif de l'instrument, on aura la proportion

$$d : 1 :: p : p + x, \text{ d'où } d = \frac{p}{p+x}.$$

En donnant successivement à d les valeurs 0,9;0,8; 0,7;0,6,...0,5, on aura les poids qu'il faudra ajouter au poids p de l'instrument; on le plongera ensuite dans l'eau pure; on notera sur la tige les densités 0,9; 0,8...0,5. Le reste s'achèvera comme nous l'avons indiqué plus haut.

213. Les aréomètres les plus connus dans le commerce, sont ceux de Beaumé. Pour graduer ces instrumens, on les plonge successivement dans l'eau pure et dans un mélange de 85 parties d'eau et de 15 de sel. On divise l'intervalle en 15 parties égales; on prolonge ensuite l'échelle au-dessous et au-dessus. Sur cet aréomètre l'acide nitrique va jusqu'à 45°, l'acide sulfurique jusqu'à 66°. L'aréomètre ainsi gradué sert pour les liquides plus pesans que l'eau. Il est connu sous le nom de *pèse-sel*, ou de *pèse-acide*. Pour les liquides plus légers que l'eau, on plonge successivement l'instrument dans l'eau pure, et dans une dissolution de 90 parties d'eau et de 10 parties de sel. On divise l'intervalle en dix parties égales, et l'on prolonge la division au-dessus. L'alcool du commerce marque 35°, l'alcool pur 44 à 45°, l'éther sulfurique 70°, etc.

Voici comment on le gradue de manière à lui faire marquer immédiatement les densités.

Supposons que l'instrument (*fig.* 112) plonge jusqu'en

A dans l'eau pure, et qu'il s'enfonce jusqu'en B dans un autre liquide. Supposons de plus que l'intervalle AB comprenne m divisions, dont chacune correspond à $\frac{1}{100}$ de variation de densité. Soit V le volume CA, et V' le volume CB; ces deux volumes, ayant le même poids (celui de l'instrument), sont en raison inverse des densités des liquides. Si donc 1 est la densité de l'eau, on aura

$$V : V' :: 1 : 1 - \frac{m}{100} : 1, \text{ d'où } V' = \frac{100\,V}{100 - m},$$

$$\text{d'où } V' - V = AB = \frac{m\,V}{100 - m}.$$

Si l'on fait successivement $m = 1, 2, 3$, etc., on aura $\frac{1\,V}{99}$; $\frac{2\,V}{98}$; $\frac{3\,V}{97}$ pour les portions de la tige qui correspondent aux densités $1 - \frac{1}{100}$; $1 - \frac{2}{100}$, etc.; il ne reste donc qu'à tracer sur la tige les divisions correspondantes aux volumes $\frac{V}{99}$; $\frac{2\,V}{98}$; $\frac{3\,V}{97}$;....

Pour cela on construira un triangle équilatéral (*fig.* 113) sur une ligne $m\,n$ préalablement divisée en parties proportionelles à $\frac{1}{99}$; $\frac{2}{98}$; $\frac{3}{97}$; et prenant $pK = AD$, KF, parallèle à $m\,n$, sera divisée en parties proportionnelles à celles de $m\,n$. De sorte qu'en plaçant la tige de l'aréomètre sur la ligne KF, elle sera divisée convenablement. On en agira de même pour un autre aréomètre.

L'aréomètre ainsi construit donnera les densités des liquides plus légers que l'eau; il deviendra propre à donner les densités des liquides plus pesans, si l'on prolonge la division de la tige au-dessous de A, de manière que les parties soient, à dater de ce point, $\frac{V}{101}$;

$\frac{2V}{102}$; $\frac{3V}{103}$; etc.

En effet, soit V' le volume de l'aréomètre plongé dans un liquide d'une densité $1 + \frac{m}{100}$, on aura

$V : V' :: 1 + \frac{m}{100} : 1$, d'où l'on déduit $V - V' = \frac{Vm}{100 + m}$; et par suite, en faisant successivement $m = 1$; $= 2$; $= 3$, on aura la progression ci-dessus.

(*Voyez* les additions.)

Du Maximum de densité de l'eau.

214. En général la densité d'un corps est d'autant plus grande que sa température est moins élevée. L'eau n'obéit pas à cette loi générale, et présente un maximum de densité à environ + 4 degrés. A dater de ce point la densité est d'autant plus faible que la température est plus basse. On démontre l'existence de ce maximum de diverses manières.

M. Hope, physicien anglais, dispose dans un cylindre deux thermomètres, l'un dans la partie inférieure, l'autre près de l'ouverture. Il remplit ce cylindre d'eau à la température de la glace; il le place ensuite dans une chambre dont la température est à 15 degrés; le thermomètre inférieur s'est d'abord élevé jusqu'à 3°,33; le thermomètre près de l'ouverture a commencé à monter à son tour, et jusqu'à ce qu'il ait atteint la température de 3°,33; l'autre est resté stationnaire à 3°,33, et après 3°,33 le thermomètre inférieur a toujours été à une température plus basse que le thermomètre supérieur. Il résulte évidemment de

cette expérience que l'eau de o à 3°,33 augmente de densité, tandis qu'à dater de ce point elle devient d'autant plus légère qu'elle est plus échauffée.

Dans d'autres expériences il a obtenu le maximum à 3°,88, d'où il conclut que le maximum de densité de l'eau est entre 3°,33 et 3°,88.

M. Tralès, savant suisse, place le même point à 4°,35. MM. Gilpins et Blagden, en pesant de l'eau à diverses températures, trouvent le maximum de densité de ce liquide à 3°,88.

M. Lefèvre Gineau, ayant cherché les pertes qu'éprouve un cube métallique plongé successivement dans de l'eau à diverses températures, a trouvé que la perte la plus grande était à la température de 4°,44.

De l'ensemble de ces expériences on doit conclure que l'eau présente un maximum de densité qui est peu éloigné de la température de 4 degrés.

Le gramme est le poids d'un centimètre cubique d'eau pure prise à la température du maximum de densité.

On a souvent besoin de connaître la dilatation de l'eau. Nous placerons ici une table de cette dilatation depuis — 12 jusqu'à + 100 degrés; nous la trouvons dans le 1er volume des *Ann. de ch. et de phys.*, dont les savans rédacteurs l'ont extraite du t. 2e du *Natural Philosophy* de M. Young.

Table de la Dilatation de l'Eau.

DEGRÉS du thermomètre centésimal.	DILATATIONS observées.	DEGRÉS du thermomètre centésimal.	DILATATIONS observées.
— 12°. . .	0,00185D. (1)	+ 22°. . .	0,00218 G.
— 1°. . .	0,00019 G.	+ 23°. . .	0,00243 G.
0°. . .	0,00012 G.	+ 24°. . .	0,00268 G.
+ 1°. . .	0,00006 G.	+ 25°. . .	0,00292 G.
+ 2°. . .	0,00003 G.	+ 26°. . .	0,00318 G.
+ 3°,89 *max*.	0,00000 G.	+ 27°. . .	0,00346 G.
+ 5°. . .	0,00001 G.	+ 28°. . .	0,00374 G.
+ 6°. . .	0,00003 G.	+ 29°. . .	0,00402 G.
+ 7°. . .	0,00007 G.	+ 30°. . .	0,00420 G.
+ 8°. . .	0,00013 G.	+ 35°. . .	0,00598 G.
+ 9°. . .	0,00020 G.	+ 40°. . .	0,00809 K.
+ 10°. . .	0,00027 G.	+ 45°. . .	0,01012 K.
+ 11°. . .	0,00037 G.	+ 50°. . .	0,01258 K.
+ 12°. . .	0,00047 G.	+ 55°. . .	0,01517 K.
+ 13°. . .	0,00059 G.	+ 60°. . .	0,01776 K.
+ 14°. . .	0,00072 G.	+ 65°. . .	0,02060 K.
+ 15°. . .	0,00086 G.	+ 70°. . .	0,02352 K.
+ 16°. . .	0,00103 G.	+ 75°. . .	0,02661 K.
+ 17°. . .	0,00120 G.	+ 80°. . .	0,02983 K.
+ 18°. . .	0,00137 G.	+ 85°. . .	0,03319 K.
+ 19°. . .	0,00157 G.	+ 90°. . .	0,03683 K.
+ 20°. . .	0,00176 G.	+ 95°. . .	0,04043 K.
+ 21°. . .	0,00198 G.	+ 100°. . .	8,04333 K.

Par la connaissance du maximum de densité on explique pourquoi le fond de tous les grands lacs, alimentés par les eaux provenant de la fusion des neiges, est entretenu constamment à la température de 4 degrés environ. A cette température l'eau, étant très-pesante, tombe dans le fond. On conçoit encore également bien la formation de

(1) La lettre D. signifie Dalton; G., Gilpin; K., Kirwan.

ces puits cylindriques qu'on rencontre aux milieu des glacières.

215. La détermination de la capacité des vases se trouve naturellement placée ici. L'irrégularité des formes ne permet pas de faire usage des théorèmes de géométrie; pour cette détermination il faut avoir recours aux pesées. On peut obtenir la capacité d'un vase de deux manières; en le pesant vide d'air et plein d'eau, ou successivement plein d'air et plein d'eau. Dans le premier cas le nombre de grammes corrigé de la température, exprimera le nombre de centimètres cubiques qui représente la capacité du vase. Dans le second, il faut y ajouter le poids de l'air du ballon, puisque ce poids a été retranché de celui du ballon plein d'eau. Nous donnerons les détails de l'expérience pour ce dernier cas.

Exemple.

L'expérience est faite à 20°,1.

Poids du ballon plein d'air.	$542^{g},417$
plein d'eau.	$6109^{g},559$
Différence.	$5567^{g},142$
Poids de l'air contenu.	$6^{g},650$
Eau contenue dans le ballon.	$5573^{g},792$

Si l'expérience était faite à la température du maximum de densité de l'eau, ce nombre de grammes représenterait un égal nombre de centimètres cubes, et la capacité du ballon serait de $5^{\text{litres}},574$. Mais l'eau étant dilatée par l'élévation de température, ce nombre de grammes représente une capacité plus grande. Et, d'après ce que nous avons dit sur les dilatations, il est visible que le nombre de grammes 5573,792 doit être multiplié par

$1 + E\,(20,1 - 3,42)$, E étant le coëfficient de la dilatation absolue de l'eau, rapporté à la température 3°,42, et qui est égal à 0,000466. On aurait ainsi $5^{\text{litres}},617$ pour la capacité du ballon à 20°,1.

Si maintenant on veut connaître la même capacité à 3°,42, il faut tenir compte de la dilatation du vase. Nous savons qu'il s'est dilaté dans le rapport de $1 + V.\ 3,42$ à $1 + V.\ 20,1$. V étant le coëfficient de la dilatation du verre, égal à $(\frac{1}{38700})$, il faut, pour corriger l'effet de la dilatation, le multiplier par ce rapport; ce qui donne $5^{\text{litres}},615$.

216. Nous n'avons pas tenu compte de l'influence de l'air extérieur sur les pesées, parce qu'en général elle est faible, et même souvent nulle; ainsi, quand nous pesans un ballon plein d'air, et que nous le pesons ensuite vide, la différence est toujours le poids de l'air contenu dans le ballon, car la perte éprouvée par le ballon, toujours égale au poids du volume d'air déplacé, est la même quand il est plein que lorsqu'il est vide. (Principe d'Archimède, n° 44.)

Voici d'ailleurs la manière de tenir compte de la perte que fait un corps dans l'air. Supposons que le poids du corps soit P, et que V soit son volume, la perte sera égale au poids du volume du fluide déplacé; si l'expérience était faite à la pression $0^{m},76$ et à la température de la glace fondante, le poids du volume V serait en grammes $V \times 1^{g},299$, puisqu'un litre d'air, pris dans ces circonstances, pèse $1^{g},299$. Si la pression et la température étaient différentes, et qu'elles fussent H et t, alors la perte deviendrait $\frac{V \times 1^{g},299 \times H}{(1 + at)\ 0,76}$, a étant le coëfficient de la dilatation des

gaz; car on a vu que le poids d'un volume d'air donné est en raison directe de la pression, et en raison inverse de la dilatation.

217. A l'article des densités des gaz, nous avons fait tous nos raisonnemens dans la supposition d'un gaz privé d'humidité; on peut aussi connaître les densités des gaz secs, quoiqu'on n'ait à sa disposition que des gaz humides. Il nous est facile de résoudre cette question en faisant usage des données que nous possédons sur les gaz et sur les vapeurs.

Pour ne pas compliquer le problème, on suppose ordinairement les gaz complètement saturés de vapeur d'eau; il suffit alors de se rappeler que la densité de la vapeur est, à température et à pression égales, les $\frac{5}{8}$ de celle de l'air, et de plus qu'un espace déterminé, vide ou plein d'un gaz quelconque, admet à une température donnée la même quantité de vapeur (1).

---

(1) Soit P le poids d'un volume de gaz humide à la pression H et à la température t, il s'agit d'avoir le poids du même volume de gaz sec à la pression $0^m,76$ et à la température de la glace fondante. Soit P' ce poids, soit f la force élastique de la vapeur que contient le gaz humide; le poids P' deviendra $\frac{P' \times (H-f)}{0,76}$ à la pression $H-f$. Pour le porter à la température t, il faudra le diviser par $1+at$ (n° 63); ainsi à la température t et à la pression $H-f$, il sera $\frac{P' \times (H-f)}{(1+at)\,0,76}$.

Il faut ajouter à ce poids de la vapeur que renferme le gaz humide; cette vapeur remplit tout le volume d'air : sa force élastique est f, sa densité est $\frac{5}{8}$, sa température est t; son poids sera donc $\frac{5 \times P' \times f}{8\,(1+at)\,0,76}$.

Ajoutant cette quantité au poids de l'air sec, on aura $\frac{P'\,(H-\frac{5}{8}f)}{(1+at)\,0,76}$.

Il résulte de là qu'on peut toujours, de la connaissance du poids d'un volume donné d'un gaz humide, déduire le poids d'un égal volume de ce même gaz sec, à la pression $0^m,76$ et à la température de la glace fondante. Il est donc à peu près indifférent, pour déterminer les densités de deux gaz, de peser ces gaz secs ou humides; cependant on est dans l'habitude de dessécher préalablement les gaz, pour éviter les calculs.

Établissant une équation de condition entre P et cette expression, on n'aura que P' d'inconnu. On tirera de l'équation de condition la valeur de cette inconnue.

218. *Tableau des densités des corps solides et des corps liquides.*

Platine	20,722 Kl. (1) 20,980 Br.
Or	19,258 Br.
Mercure	13,586 B. et A.
Plomb	11,352 W.
Palladium	11,3 écroui W. 11,8 lam.
Manganèse	6,85 Be.
Nikel	8,446 8,324 recuit.
Cobalt	8,602
Argent	10,474 Br. 10,784 Kl.
Bismuth	9,822 Br. 9,070 Br.
Cadmium	8,604 St.
Cuivre	8,895 Ha.
Laiton	8,395 Br.
Arsenic	8,308 Be.
Fer	7,788 Br.
Molybdène	7,400 Hi.
Acier	7,767 Mu.
Etain	7,291 Br.
Zinc	7,166
Potassium	0,865 G. et T.
Sodium	0,972 G. et T.
Marbre	2,25 à 2,32
Spath pesant	4,3 — 4,4
Terre glaise	1,8 — 2,0
Cristal de roche	2,653 Br.
Pierre à fusil	2,58 à 2,67
Spath fusible	2,44 — 260
Pierre-ponce	0,914 Br.
Grès	2,11 à 2,56
Verre commun vert	2,5 — 2,6
Verre blanc	2,4 — 2,5
Cristal anglais	3,329 Br.
Cristal français	3,20 C. et B.
Verre comm. franç.	2,487 C. et B.
Oxide de fer (fer oxidulé)	5,00
Sulfure de fer (persulfure)	4,00 à 4,8
Salpêtre	1,900 Mu.
Sel ordinaire	1,918 *id.*
Sel ammoniac	1,420 *id.*
Sulfate de chaux (gypse)	2,31
Carbonate de ch.	2,70
Ambre jaune	1,065 *id.*
Soufre	1,800 *id.*
Cire	0,95 à 0,96
Alcool (absolu)	0,792 Lo.
Ether sulfurique	0,715
Huile d'olive	0,913 Mu.
Huile de térébenth.	0,792 *id.*
Acide nitrique	1,510 G. 1,513 T.
Acide nitreux	1,461 Du.
Acide sulfurique	1,842
Chêne (frais)	0,93 Mu.
— (vieux)	1,67 *id.*
Hêtre	0,85 *id.*
Sapin	0,55 *id.*
Liége	0,24 *id.*
Eau (pure)	1,000
Glace	0,916 Mu.

(1) Les lettres Kl. signifient Klaproth; Br., Brisson; B. et A., Biot et Arago; W., Wollaston; Be., Bergmann; St., Stromeyer; Ha., Hatchet; Hi., Hielm; Mu., Muschenbroeck; G. et T., Gay-Lussac et Thénard; Du., Dulong; Lo., Lowitz; C. et B., Cauchoix et Biot; G., Gay-Lussac; T., Thénard; A. et G., Arago et Gay-Lussac.

219. *Tableau des densités des gaz et des vapeurs.*

NOMS DES FLUIDES ÉLASTIQUES.	DENSITÉ déterminée par expérience	NOMS des observat.	DENSITÉS calculées.	POIDS de 1 lit. de gaz, trouvé par expérience, à 0° et à $0^m,76$ de pression	POIDS de 1 lit. de gaz, trouvé par le calcul, à 0° et à $0^m,76$ de pression.
				gramm.	
Air.	1,0000.	. . . .	. . . .	1,2991.	
Oxygène.	1,1036.	B. et A. (1)	. . . .	1,4337.	
Idem.	1,1026.	B′. et D.	. . . .	1,4323.	
Gaz azote.	0,9691.	B. et A. .	. . . .	1,2590.	
Idem.	0,9757.	B′ et D.	. . . .	1,2675.	
Gaz hydrogène. . . .	0,0688.	B′ et D.	. . . .	0,0894.	
Chlore.	2,4216.	G. et T. .	2,4260.	3,2088.	3,1516.
Gaz hydriodique. . .	4,4288.	G.	4,3399.	5,7719.	
— fluorique silicé. . .	3,5735.	J-D. . . .	. . . .	4,6423.	
— chloroxi-carbonique.	. . . .	. . . . .	3,3990.	. . . .	4,4156.
Deutoxide de chlore. .	. . . .	. . . . .	2,3155.	. . . .	3,0081.
Gaz fluoborique. . . .	2,3709.	J-D. . . .	. . . .	3,0800.	
— sulfureux.	2,1930.	H-D. . . .	. . . .	2,8489.	
— sulfureux.	2,234 .	T.			
Cyanogène.	1,8064.	G.	1,8197.	2,3467.	2,3640.
Protoxide d'azote. . .	1,5269.	C.	1,5269.	1,9752.	1,9836.
Acide carbonique. . .	1,5196.	B. et A. .	. . . .	1,9741.	
Idem.	1.5245.	B′ et D.	. . . .	1,9805.	
Gaz hydrochlorique. .	1,2474.	B. et A. .	1,2474.	1,6205.	
— hydrosulfurique. .	1,1912.	G. et T. .	. . . .	1,5475.	1,6205.
Deutoxide d'azote. . .	1,0388.	B″. . . .	1,0390.	1,3495.	1,3498.
Hydrogène bi-carburé.	. . . .	. . . . .	0,9816.	. . . .	1,2752.
Oxide de carbone. . .	0,9569.	C′.	0,9732.	1,2431.	1,2643.
Hydrogène per-phosphoré	0,9022.	T′.			
Hydrogène proto-phosph.	0,0870.	H-D. . . .			
Idem.	0,9716.	T′.			
Gaz ammoniacal. . . .	0,5967.	B′. et A.	0,5910.	0,7752.	0,7678.
Hydrogène proto-carburé.	. . . .	. . . . .	0,5596.	. . . .	0,7270.
Hydrogène arsénié. . .	0,529 .	T′.			
Idem.	0,5552.	H-D. . . .			

Les densités de la quatrième colonne ont été calculées en ajoutant le poids des élémens des gaz composés.

(1) Les lettres B. et A. signifient Biot et Arago ; B′. et D., Berzelius et Dulong ; B″., Bérard ; C., Colin ; C. et R., Colin et Robiquet ; C′., Cruikshancks ; G., Gay-Lussac ; G. et T., Gay-Lussac et Thénard ; H-D., Humphry Davy ; J-D., John Davy ; T., Thénard ; T′., Thompson ; T″., Trommsdorff.

Ainsi, un volume d'oxide de chlore est formé d'un volume d'oxygène et d'un demi-volume de chlore. Il faut donc réunir le poids d'un volume d'oxygène 1,102 à celui de $\frac{1}{2}$ volume de chlore ou 1,211; ce qui fait 2,314 pour la densité du gaz. Le gaz ammoniacal est formé d'une partie et demie d'hydrogène et d'une demi-partie d'azote. Le poids d'une partie et demie d'hydrogène est égal à 0,102; celui d'une demi-partie d'azote est égal à 0,487; la somme de ces deux nombres fait 0,589; ce qui diffère peu de 0,596 trouvé directement.

De la même manière on trouverait les densités des autres gaz composés. (*Voyez* le n° 103.)

DE L'ATMOSPHÈRE.

220. L'air atmosphérique est un composé d'oxygène et d'azote, dans le rapport de 21 à 79. Il contient toujours dans la nature plus ou moins de vapeur d'eau, dont nous avons appris à reconnaître la présence et même la quantité; voyez *hygrométrie* (n° 125). Il renferme aussi toujours une très-petite quantité d'acide carbonique provenant de la respiration des animaux et d'autres sources. Nous reviendrons sur ce sujet à l'article de la météorologie (fin de l'ouvrage).

Les propriétés physiques de l'air atmosphérique sont celles de tous les gaz permanens. Ce fluide transmet également la pression dans tous les sens; de plus, en vertu de son élasticité, propriété inhérente à la nature des gaz, il

exerce une pression plus ou moins considérable sur les parois des vases qui le renferment.

221. Le principe de l'égalité de pression dans tous les gaz se vérifie à l'aide d'un appareil peu compliqué, et qui consiste en un cylindre creux *M npq* (*fig.* 114), dans les parois duquel on a percé à différentes hauteurs des ouvertures *r*, *r'*, *r''*, *r'''*. Dans ces ouvertures sont fixés des tubes recourbés en forme de syphons; chacun de ces syphons renferme un liquide qui se met de niveau dans les deux branches. Le cylindre est fermé dans sa partie supérieure, il est ouvert dans sa partie inférieure; on le plonge dans un vase rempli d'eau, et l'on voit, à mesure qu'il s'enfonce, le liquide monter également dans tous les tubes. Pour que ce cylindre pénètre dans le liquide, il faut nécessairement exercer sur sa partie supérieure une certaine pression; l'air intérieur se trouve lui-même comprimé et transmet la compression également à tous les points de sa masse.

222. On démontre la pression de l'atmosphère par une expérience fort curieuse. Prenez deux hémisphères concaves (*fig.* 115); joignez-les; et, afin de rendre leur jonction plus facile et plus exacte, placez un cuir mouillé entre les deux bords; ensuite faites le vide en ayant soin de presser sur l'hémisphère supérieur. Si vous attendez que le vide soit parfait, et si vous enlevez la sphère après avoir fermé le robinet qui communique avec la machine pneumatique, il faudra les plus grands efforts pour séparer les deux hémisphères. Cet effet ne peut être attribué qu'à la pression atmosphérique; car si vous ouvrez le robinet, l'air rentre et les deux hémisphères se séparent avec facilité. Cette expérience est due à Otto de Guerick.

223. Dans une masse d'air ou de tout autre fluide élastique en équilibre, la force élastique dans chaque point est égale à la pression. En effet, soit (*fig.* 116) un vase *ABCD* ouvert par la partie inférieure *AB*, et fermé en *CD* par le moyen d'une vessie mouillée : qu'on ferme la partie *AB*, la vessie restera toujours tendue; le ressort de l'air intérieur est donc égal à la pression extérieure. Qu'on place le vase sur une machine pneumatique, et qu'on fasse le vide, dès les premiers coups de piston, le ressort de l'air du vase étant diminué ne pourra plus faire équilibre à la pression atmosphérique; la vessie fléchira et même finira par crever si le vide est porté assez loin.

224. La pression de l'atmosphère est la même dans tous les sens; la pression qui agit de haut en bas, soutient le mercure dans le baromètre. Qu'on ôte le baromètre du bain dans lequel il est plongé, en ayant soin de boucher d'abord avec le doigt l'extrémité ouverte plongeant dans le bain; qu'on le renverse; qu'on y laisse la même quantité de mercure; qu'on applique sur la partie ouverte une surface qui s'y adapte exactement, et qu'on le renverse de nouveau, on verra que le mercure s'y maintiendra à la même hauteur. Ici le mercure n'est soutenu qu'en vertu de la pression de l'atmosphère qui s'exerce de bas en haut. Ainsi, la pression atmosphérique s'exerce de bas en haut et de haut en bas avec une égale énergie. Il ne reste plus qu'à comparer la pression latérale à la verticale. Pour cela, soit un flacon *AB* (*fig.* 117) auquel sont adaptés deux tuyaux horizontaux *N* et *V*; ce vase est complètement plein d'eau; de plus, un tube, ouvert par les deux bouts, est introduit à frottement dans le col *O* de ce flacon. Ce tube est destiné à

transmettre la pression atmosphérique; on le remplit aussi de liquide. Si on ouvre le canal supérieur *N*, l'eau s'écoule, et l'écoulement continue jusqu'à ce que le niveau de l'eau dans l'intérieur du tube soit à la hauteur de l'orifice *N*. Puisque l'écoulement cesse, il faut qu'il y ait équilibre entre la pression atmosphérique qui s'exerce latéralement en *N* et celle qui s'exerce verticalement par le tube *O*. Il est donc bien démontré par cette expérience et par les précédentes que la pression atmosphérique agit, dans tous les sens, avec la même puissance.

Gazomètres.

225. Dans beaucoup de recherches de physique, il est nécessaire de pouvoir faire écouler l'air, ou tout autre gaz, avec une vitesse constante. L'appareil imaginé pour cet objet est appelé gazomètre à niveau constant.

Pour qu'on conçoive bien le mécanisme de cet important appareil, nous supposerons que, dans l'expérience du n° 224, on ouvre le canal *V* placé au-dessous de l'ouverture inférieure du tube *O H*; on verra l'air entrer par l'extrémité *H* de ce tube, et l'eau s'écouler par le canal *V* avec une vitesse constante; le poids de la colonne d'eau *H I*, plus le poids de l'atmosphère, force l'air en *V*, et l'écoulement de l'eau a lieu en vertu de la différence de niveau *H I*, et lui est proportionnel; de sorte que sa vitesse est constante tant que l'eau est maintenue au-dessus du point *H*.

Soit maintenant *A* un vase rempli d'air (*fig.* 118); c'est cet air qu'il faut chasser par portions égales en temps égaux. A cet effet on place au-dessus de ce vase un autre vase

B rempli d'eau. Un tuyau dont l'orifice inférieur *Q* est tourné en haut, établit la communication entre le réservoir d'eau et le vase rempli d'air. On adapte au vase supérieur un tube *OH*, qui plonge jusqu'à une certaine profondeur *H*; l'ouverture *V*, par laquelle on remplit ce vase de liquide, est fermée. Il est visible que si l'on ouvre le robinet *R*, le liquide tombera dans le vase *A* avec une vitesse constante; car le tuyau de communication étant nécessairement rempli d'eau pendant toute l'expérience, et d'ailleurs la pression atmosphérique s'exerçant également en *H* et en *Q*, ce n'est que la hauteur *HQ* qui détermine le liquide à tomber; et tant que l'extrémité *H* du tube *OH* plongera dans le liquide, l'écoulement du gaz par un robinet *R'* se fera avec une égale rapidité. Si la capacité de la partie *HV* est suffisamment grande, on pourra aussi expulser tout le gaz du vase *A*; si elle est trop petite, et c'est le cas ordinaire, on remplacera l'eau écoulée au fur et à mesure.

Pour recueillir le gaz, il suffira d'avoir un second gazomètre *A' B'* semblable au premier. Supposons que le vase *A'* soit plein d'eau, qu'un tube *tk* par lequel s'écoule le gaz plonge au fond de ce second gazomètre, alors l'eau du vase *A'* se trouve dans le cas du n° 224. L'ouverture du robinet *E'* étant à la même hauteur que l'extrémité *K'* du tube, l'eau étant pressée au point *K'* et *E'* ne s'écoulera pas, mais il suffira d'un petit excès de pression en *K'* déterminé par la vitesse du gaz, pour que l'eau sorte par le robinet *E'*. Le vase *A'* se videra ainsi, et l'eau chassée sera remplacée par le gaz. Dans l'intervalle des gazomètres, on peut faire subir toutes les épreuves que les recherches nécessiteront. Par exemple, s'agit-il de comparer les ca-

pacités des gaz, comme l'ont fait MM. de la Roche et Bérard, chaque gaz à sa sortie du gazomètre *A* sera échauffé et porté à une température déterminée; on le recevra ensuite dans un calorimètre renfermant une quantité connue d'eau froide (Voyez les *capacités*), etc. Les deux parties de l'appareil sont tellement disposées, que le gaz peut passer alternativement de l'une dans l'autre.

Ce gazomètre, que nous venons de décrire, suffit pour les gaz insolubles. Nous en décrirons un autre. (*Voyez* la fin de l'ouvrage, *Chaleur animale.*)

Du Syphon.

226. C'est à la pression de l'atmosphère que sont dus les effets du syphon. Cet instrument, qui sert à transvaser les liquides, consiste, en général, en un tube recourbé, à deux branches inégales, et dont la plus courte plonge dans le liquide qu'on veut transvaser (*fig.* 119). Soit *A B* un vase plein d'eau : on se propose de faire passer cette eau dans le flacon *N;* pour cela on plonge la branche la plus courte *H O* dans le liquide, et l'on aspire par l'extrémité opposée *C*, de manière à raréfier l'air de l'intérieur du tube; la liqueur s'introduit à l'instant dans celui-ci par la pression de l'air extérieur. On retire la bouche quand le syphon est plein, le liquide de la plus longue branche *H K* tombe, l'écoulement continue jusqu'à ce que le vase supérieur *A B* soit vide.

La théorie du syphon est facile d'après les notions que nous avons acquises sur les effets de la pression de l'atmosphère. Cette pression s'exerce avec une égale intensité, à l'extrémité de la plus longue branche et sur la surface

du liquide, de sorte qu'avant la raréfaction de l'air, le niveau du liquide dans le tube est le même que dans le vase. Si, au contraire, l'air est raréfié par la succion, l'eau du vase étant pressée par le poids total de l'atmosphère, doit s'élever dans le tube et le remplir. Supposons le tube plein : il est visible que les points *O* et *E* étant également pressés par l'air extérieur, et les deux parties *H O* et *H E* du syphon se faisant équilibre, la partie *E K* doit tomber; et, comme elle est sans cesse remplacée par le liquide du vase supérieur, l'écoulement ne finira que lorsque tout le liquide sera passé dans le vase *N*.

Si l'appareil de la figure 119 était placé dans le vide, le liquide retomberait dans chaque branche en vertu de la pesanteur.

227. Pour transvaser les liquides corrosifs, on joint au tube principal un tube latéral, et c'est par ce tube secondaire que se fait l'aspiration; on a encore soin de le renfler vers sa partie inférieure, afin d'y accumuler le liquide, et quand il y est parvenu, on arrête la succion (*fig.* 120).

On peut encore remplacer le tube latéral par une petite pompe aspirante; il faut avoir l'attention de fermer la partie inférieure *m* pendant qu'on fait aller la pompe.

228. La construction d'un petit appareil assez curieux, connu sous le nom de *vase de Tantale*, est fondée sur la théorie du syphon. Il est composé d'un verre ordinaire dans l'intérieur duquel est un tube recourbé *C O H*; la plus courte branche *O C* est contenue dans le verre, tandis que la plus longue sort par le pied sur lequel il est monté. Si l'on verse de l'eau dans le verre de manière à ne pas couvrir le sommet *O* du syphon, on n'observe rien de particulier; mais, du moment que le niveau du liquide

est au-dessus du sommet O, il s'écoule par la plus longue branche, et l'on a beau verser de liquide, on ne parvient jamais à le remplir (*fig.* 121).

229. Il y a dans la nature des fontaines intermittentes dont le jeu est analogue à celui du vase de Tantale. Soit (*fig.* 122) une cavité produite dans la terre : lorsque les eaux l'auront remplie jusqu'au point le plus élevé K, la fontaine coulera jusqu'à ce que l'eau soit au-dessous de $m\,n$; l'écoulement recommencera quand les pluies auront ramené l'eau à la même hauteur K.

Du Décroissement de la densité de l'Atmosphère.

230. Nous démontrerons que lorsque les hauteurs de l'atmosphère croissent en progression arithmétique, les densités correspondantes de l'air décroissent en progression géométrique. En effet, supposons que $A\,H$ (*fig.* 123) représente la hauteur de toute l'atmosphère, c'est-à-dire que cette droite soit tirée verticalement depuis le sol jusqu'aux confins de l'atmosphère, et supposons en outre qu'on ait mené perpendiculairement à cette droite des lignes horizontales à égales distances les unes des autres, représentant les différentes couches de l'atmosphère. Soit P le poids de toute la colonne de l'atmosphère qui presse sur la surface de la terre, P' le poids de toute la colonne d'air qui pèse sur la première couche, P'' celui de toute la colonne d'air qui pèse sur la seconde couche, et ainsi de suite; soit D la densité de la première couche, D' la densité de la seconde, D'' celle de la troisième, D''' celle de la quatrième, etc... ; $P - P'$ sera le poids de la première couche inférieure, $P' - P''$ sera le poids de la seconde,

$P'' - P'''$ celui de la troisième, et ainsi de suite. Or les poids de deux quantités d'un même gaz, prises sous le même volume, sont proportionnels aux densités; d'ailleurs on suppose que les différentes couches d'air aient toutes des volumes parfaitement égaux, on aura donc la proportion : $P - P'$, poids de la première couche, est à $P' - P''$, poids de la seconde couche, comme $D : D'$; mais déjà $D : D' :: P' : P''$, car les densités des gaz pris sous le même volume sont proportionnelles aux pressions. Donc, à cause du rapport commun de ces deux proportions, $P - P' : P' - P'' :: P' : P''$; d'où, en égalant le produit des extrêmes à celui des moyens $P P'' - P' P'' = P'^2 - P' P''$; ou bien $P P'' = P'^2$, égalité d'où l'on tire la proportion $P : P' :: P' : P''$. On trouverait de même $P' : P'' :: P'' : P'''$; et ainsi de suite; on aura donc la progression géométrique

$$\div\div P : P' : P'' : P''' : \ldots, \text{etc.},$$

qui est évidemment décroissante, puisque P représente le poids de toute l'atmosphère, tandis que P' représente ce poids diminué de celui de la première couche, P'' ce même poids diminué de celui des deux premières couches, et ainsi de suite. D'ailleurs il est évident que les hauteurs des différentes couches d'air, à partir du sol, forment une progression arithmétique croissante; et, comme d'une autre part, les densités sont proportionnelles aux pressions, la proposition énoncée est démontrée, c'est-à-dire que les densités des différentes couches d'air sont en progression géométrique décroissante.

DU BAROMÈTRE.

231. L'invention du baromètre est due à Torricelli. Ce savant disciple de Galilée, méditant sur la cause de l'ascension de l'eau dans les pompes, eut l'heureuse idée de comparer la hauteur du mercure dans un baromètre à la hauteur de l'eau dans les pompes, et il trouva que le rapport des deux hauteurs était le rapport inverse des densités, de sorte que l'eau qui pèse 13,586 fois moins que le mercure s'élève à une hauteur 13,586 fois plus grande. Torricelli conclut de ce fait que c'était réellement, comme il l'avait soupçonné, la pression de l'atmosphère qui déterminait l'eau et le mercure à s'élever jusqu'à ce qu'il y eût équilibre.

Cette importante découverte date de 1643. Peu de temps après, la nouvelle s'en répandit en France; l'expérience fut répétée, en 1646, par Mersenne et Pascal; l'année suivante, Pascal imagina de la rendre plus décisive en la faisant à différentes hauteurs. Il vit baisser le mercure, à mesure que le baromètre était porté à des hauteurs plus grandes. Perier qui fit, à l'invitation de Pascal, des essais semblables sur le Puy-de-Dôme, obtint le même résultat. L'explication de Torricelli fut donc pleinement confirmée; il fallut renoncer à l'idée de l'horreur de la nature pour le vide.

232. L'usage du baromètre est indispensable dans une infinité d'expériences; nous avons déjà eu occasion de

nous en servir plusieurs fois dans les parties précédentes de cet ouvrage.

Des différentes espèces de Baromètres.

233. Il existe trois sortes de baromètres : le baromètre à cuvette, le baromètre à syphon et le baromètre à cadran; mais, comme nous le verrons tout à l'heure, ce dernier n'est qu'une application du baromètre à syphon.

Du Baromètre à cuvette.

234. Le baromètre à cuvette consiste en un tube de verre long d'environ trois pieds, fermé par un bout et ouvert par l'autre, et plongé verticalement par son extrémité ouverte dans une cuve remplie de mercure, de manière qu'une partie de ce mercure, en vertu du poids de l'atmosphère qui pèse sur la surface du bain, se tient à une certaine hauteur dans le tube. Pour que le mercure se tienne dans le tube, il faut d'abord le remplir complètement de ce métal, le boucher avec le doigt, et le renverser dans une cuvette. Le baromètre, ainsi formé, serait toujours imparfait, parce que le mercure se pénètre d'eau et d'air; ces deux substances se dégageraient peu à peu et empêcheraient, par leur ressort, le mercure de monter à la hauteur à laquelle il monterait, si l'intérieur du tube était parfaitement vide; le seul moyen de chasser tout l'air et toute l'humidité, c'est d'abord de faire sécher, autant que possible, le tube de verre, d'y verser ensuite une petite quantité de mercure déjà bouilli, et de l'y faire bouillir de nouveau afin d'en chasser tout l'air qui aurait pu se mêler avec lui en le versant dans le tube : puis d'y verser une nouvelle quantité du même mercure, de le

faire bouillir de nouveau, et de continuer ainsi la même série d'opérations jusqu'à ce que le tube soit complètement plein de mercure. Ensuite on renverse ce tube ainsi rempli de mercure et bien purgé d'air dans une cuve également remplie de mercure; le mercure contenu dans le tube descend jusqu'en un certain point où il se fixe bientôt, laisse au-dessus de lui un espace complètement vide. Au reste l'opération précédente est laborieuse; elle demande de grandes précautions et en outre beaucoup d'habitude dans ces sortes d'expériences.

235. Il ne reste plus maintenant qu'à mesurer exactement la hauteur de la colonne barométrique. Or, comme on ne peut le faire qu'au moyen d'une échelle graduée, il faut que le zéro de cette échelle soit toujours de niveau avec la surface du mercure dans la cuvette : on voit donc qu'il faut rendre mobile ou l'échelle ou la cuvette. M. Fortin, dans la construction de ses baromètres, qui sont sans contredit les meilleurs qu'on possède en France, rend la cuvette mobile, en lui donnant simplement un fond mobile, qui s'élève ou s'abaisse par le moyen d'une vis *A*, ce qui fait monter ou descendre le niveau du mercure dans la cuvette. Par ce moyen on peut toujours amener ce niveau tangentiellement à l'extrémité inférieure d'une petite pointe d'ivoire *I* fixée invariablement, et correspondant au zéro de l'échelle. Cette échelle est fixe et tracée sur un tube de cuivre qui entoure et protége le tube barométrique, ce tube est fendu dans le sens de sa longueur afin que l'on puisse apercevoir la colonne de mercure (*fig.* 124).

Il est essentiel que l'instrument soit tenu dans une position verticale. Pour cela on l'attache, par sa partie su-

périeure, à un point fixe et on le laisse pendre librement. En outre il est renfermé dans un étui qui se partage en trois parties, lesquelles servent de supports. Quand on veut faire une observation, on ouvre l'étui, on le pose sur le sol, et le baromètre se met de lui-même dans la verticale.

Au moyen de cette monture, on observera donc avec la plus grande facilité la hauteur de la colonne de mercure dans le tube barométrique; mais, pour que toutes les observations de ce genre soient comparables entre elles, il faudra les ramener à une même température, à zéro, par exemple : car, comme il est impossible d'opérer toujours absolument à une même température, on commettrait nécessairement des erreurs en comparant les observations sans avoir égard à la température. Or ici il faut avoir égard non-seulement à la dilatation du mercure, mais encore à la dilatation du métal sur lequel est tracée l'échelle. La dilatation du mercure est cause que la hauteur observée est trop grande; la dilatation de l'échelle au contraire rend la hauteur observée trop petite, car chaque division de l'échelle s'étant dilatée d'une certaine quantité, le nombre des divisions, nécessaire pour égaler la hauteur de la colonne de mercure, est évidemment moindre à la température t, à laquelle on opère, qu'il ne le serait à 0°; pour l'échelle, il est clair qu'il faut prendre seulement la dilatation linéaire, puisqu'on ne considère que sa longueur, tandis que, pour le mercure, il faut prendre la dilatation cubique. D'après cela, représentons par h la hauteur de la colonne de mercure observée dans le tube à une certaine température marquée par t, et supposons que a soit le coëfficient $\frac{1}{5550}$ de la dilatation cubique du mercure. Comme les volumes sont en raison inverse

des densités, et que les densités sont ici en raison inverse des hauteurs, il en résulte que les volumes sont proportionnels aux hauteurs. Si par conséquent nous représentons par 1 le volume de la colonne de mercure à 0°, $1+at$ sera le volume de cette même colonne à t degré, et la hauteur x du mercure à 0° sera donnée par la proportion $1 : 1+at :: x : h$, d'où l'on tirera $x = \frac{h}{1+at}$. Soit de même a' le coëfficient de la dilatation linéaire du cuivre : ici la hauteur observée sera en raison inverse de la longueur d'une division; or, si 1 est cette longueur à 0°, à t degré elle sera $1+a't$; on aura donc la proportion

$$1 : 1+a't :: \frac{h}{1+at} : x';$$

d'où l'on tirera enfin, pour la véritable hauteur du mercure à 0°, $x' = \frac{h(1+a't)}{1+at}$. Afin de connaître exactement la température de la colonne barométrique, on dispose un petit thermomètre très-sensible dans la monture même de l'instrument, et on note le degré que ce thermomètre indique au moment de l'observation. Il est visible en effet que la température de l'appareil ne peut pas changer sans que ce thermomètre, qui fait corps avec lui, n'éprouve le même changement.

Il est inutile d'avoir égard à la dilatation du tube de verre, puisque nous avons vu (n° 44) que la hauteur de la colonne du mercure dans le baromètre doit être indépendante de la largeur du tube.

Application.

Un baromètre dont l'échelle est en cuivre marque $0^m,762$ à 22° au-dessus de zéro.

qui donnera $0^m,7565$. De même, si sur un tube barométrique de $0^m,02$ de diamètre intérieur, on lisait une hauteur de $0^m,764$, on n'aurait la véritable hauteur de $0^m,764$ qu'autant qu'on ajouterait $0^m,00004$ à $0^m,764$, ce qui donnerait $0^m,76404$.

Du Baromètre à syphon.

237. Le baromètre à syphon, ainsi nommé à cause de sa forme, n'a pas de cuvette, ou plutôt le tube lui-même en tient lieu; il est recourbé par le bas en *C* (*fig.* 125), et forme par conséquent deux branches *CA*, *CB*. Pour obtenir cette disposition, on prend un tube, le plus cylindrique possible, fermé par un bout et ouvert par l'autre. On lui donne la forme d'un syphon en le courbant à la lampe d'émailleur, et l'on fait en sorte que l'extrémité ouverte appartienne à la branche la plus courte, l'autre branche ayant plus de 28 pouces. Ensuite on fait sécher le tube, on y introduit une assez grande quantité de mercure déjà bouilli, en le versant peu à peu et le faisant bouillir à chaque fois, comme pour le baromètre à cuvette, tant pour qu'il ne reste point d'air au-dessus du mercure dans la branche fermée, que pour qu'il ne s'en trouve point de mêlé avec le mercure même. Cela posé, si *B* est le point où le mercure monte dans la branche fermée, et *A* celui où il se tient dans la branche ouverte, il est évident que la différence *AB* des niveaux de ces deux colonnes de mercure est la colonne de mercure soutenue par l'atmosphère qui presse en *A*, et par conséquent sa longueur peut tout aussi bien représenter le poids de l'atmosphère que la colonne de mercure dans le baromètre à cuvette. Mais ici la longueur de cette colonne de mercure ne peut se mesurer

qu'au moyen d'une échelle que l'on fait mouvoir parallèlement à la branche *CB*, de manière à amener le zéro de ses divisions au niveau de l'extrémité *A* de la colonne de mercure dans la plus courte branche.

Le baromètre à syphon a surtout cet avantage sur le baromètre à cuvette d'être indépendant de l'action capillaire du tube; car les deux branches ayant sensiblement le même diamètre intérieur, puisque le tube rectiligne dont on les a formées a été choisi autant cylindrique que possible, et de plus la courte branche a été prise sur la partie supérieure de la plus grande branche; les tendances à la dépression sont alors égales de part et d'autre, et se contrebalancent mutuellement.

Pour rendre portatif le baromètre à syphon, on y avait adapté un robinet à la branche ouverte. L'inconvénient de cette disposition était de salir le mercure, par la matière grasse nécessaire au jeu du robinet. M. Gay-Lussac a évité l'emploi d'un robinet et conséquemment d'une matière grasse, de la manière suivante : il réunit les deux branches *AB* et *EC* du baromètre (*fig.* 127) par un tube *B C* d'un diamètre beaucoup plus petit (1 à 2 millimètres). La courte branche fermée à sa partie supérieure, est percée latéralement d'une ouverture capillaire *E* en forme d'entonnoir. Cette ouverture, suffisante pour permettre à la pression atmosphérique de s'exercer sur le mercure de la plus courte branche, est trop petite pour laisser échapper le mercure quand on renverse le baromètre (*fig.* 128). On met l'instrument dans cette position quand on le veut transporter d'un lieu dans un autre; s'il s'introduit une petite quantité d'air dans le tube capillaire *B C D*, comme le montre la fig. 129, cet air est chassé par le mer-

cure, quand on remet l'instrument dans sa position naturelle (*fig.* 127). M. Gay-Lussac et M. Descotils se sont servi d'un instrument de ce genre dans plusieurs voyages, sans qu'il ait paru s'altérer. Cependant quelques physiciens qui ont employé un instrument construit de la même manière, se sont aperçus qu'au bout d'un certain temps il s'introduisait de l'air dans le haut de la plus grande branche. Pour remédier à cet inconvénient, on peut effiler cette dernière, comme l'indique la fig. 130 : l'air se loge alors dans l'espace *m k*, d'où il est toujours possible de le faire sortir en sécouant l'instrument. Il est vrai que cette dernière disposition rend très-difficile la construction du nouveau baromètre. Quoi qu'il en soit, le baromètre construit comme nous venons de l'indiquer peut être renfermé dans un étui en métal fendu dans une partie de sa longueur, et sur lequel est tracée l'échelle, ou bien même dans une canne.

Du Baromètre à cadran.

258. Le baromètre à cadran (*fig.* 131) ne diffère du baromètre à syphon que nous venons de détailler, qu'en ce que, au-dessus de l'orifice de la plus courte branche, se trouve une petite poulie *A* parfaitement mobile, et dont le centre est fixé à celui d'un cadran derrière lequel est attaché le baromètre. Cette poulie correspond à une aiguille destinée à parcourir les divisions du cadran, et sa circonférence est entourée d'un fil, aux extrémités duquel sont suspendus deux petits poids *p*, *p'*, dont l'un pénètre dans l'intérieur du tube, et dont l'autre est libre au-dehors. Le poids extérieur *p'* équilibre le poids *p*, tangent à la surface du mercure, et le système de ces deux poids, parfaitement mobile autour de la poulie *A*, est tel que le

poids p ne fait que poser sur la surface du mercure, sans jamais le déprimer en aucune manière.

D'après cette disposition, il est clair que quand le mercure s'abaissera dans la branche ouverte et s'élevera dans l'autre, c'est-à-dire quand l'atmosphère sera plus pesant qu'à l'ordinaire, le poids p descendra avec le mercure, et l'extrémité de l'aiguille viendra occuper la partie supérieure du cadran. Quand le mercure s'élevera dans la plus courte branche, et s'abaissera dans l'autre, le poids p montera avec lui, et l'aiguille viendra se placer dans la partie inférieure du cadran : enfin, quand le mercure sera à une hauteur moyenne, c'est-à-dire quand le poids de l'atmosphère sera moyen lui-même, l'aiguille prendra une position intermédiaire. Comme par une longue suite d'observations on a remarqué que, lorsque le mercure monte ou descend dans le baromètre, c'est ordinairement un signe de beau ou de mauvais temps, on a marqué beau temps le point le moins élevé du cadran, mauvais temps le point le plus élevé, et variable le point intermédiaire.

Avant d'observer ce baromètre, il est bon de le frapper doucement, pour vaincre le frottement des différentes parties. Quoi qu'il en soit, ce baromètre ne doit pas être employé dans les observations qui exigent une grande exactitude.

239. On a reconnu que la hauteur la plus commune du baromètre au niveau des mers, lorsque le temps est calme, est $0^m,760$ ou 28 pouces environ; c'est pourquoi c'est cette hauteur que l'on a choisie pour la hauteur moyenne. Mais il n'en est pas de même quand le temps est agité et voisin de la tempête; la hauteur du baromètre éprouve alors des variations continuelles.

240. Il ne nous reste plus maintenant qu'à faire connaître la manière dont on rassemble comparativement de longues suites d'observations sur la marche du baromètre. Le tracé graphique est le procédé le plus commode. On se sert pour cela d'une bande de papier, au milieu de laquelle on trace une ligne droite *A B* (*fig.* 132) qui la traverse d'un bout à l'autre : on la divise en un certain nombre de parties égales destinées à représenter des jours; par les points de divisions, on élève des perpendiculaires prolongées indéfiniment au-dessus et au-dessous de cette droite, puis parallèlement à elle-même, et des deux côtés de cette ligne on en trace plusieurs autres à des distances égales.

Cela fait, lorsqu'on a observé le baromètre un certain jour, si la hauteur est moyenne, c'est à-dire $0^m,760$, on marque le point *A* de la ligne principale qui correspond à ce jour-là. Si elle est plus haute d'un millimètre, par exemple, on monte à la première parallèle au-dessus de *A B;* si elle est moindre, on redescend à la parallèle qui lui correspond au-dessous de cette même ligne. On porte ainsi les observations de tous les jours successifs, chacun au rang et à la hauteur qui lui convient : par tous les points *A, b, c, d, e*... on trace la ligne brisée *A b c d e*... Cette ligne, par ses diverses sinuosités, représente fidèlement l'état du baromètre dans les époques successives auxquelles on a observé. C'est par l'inspection d'un pareil tableau que l'on voit que dans un grand nombre de cas, lorsque le baromètre a baissé, il est tombé de la pluie; et qu'au contraire, lorsqu'il s'est élevé, le temps est devenu serein. On aperçoit cependant par intervalles des exceptions à cette règle; mais elles sont beaucoup plus

rares que les cas où elle se vérifie. C'est encore par des observations de ce genre qu'on a reconnu que le baromètre, malgré toute l'irrégularité de sa marche, est cependant généralement soumis à une cause qui le fait monter et descendre périodiquement à certaines heures du jour. Ainsi cet instrument atteint son maximum de hauteur vers neuf heures du matin, après quoi il descend jusque vers quatre heures du soir où il atteint son minimum de hauteur. De là il recommence à monter jusque vers onze heures du soir, où il atteint de nouveau son maximum. Ensuite il redescend jusque vers quatre heures du matin où il atteint encore son minimum pour revenir à son maximum de hauteur vers neuf heures, et ainsi de suite; ce qui résulte particulièrement d'observations faites en Amérique par M. de Humboldt, et en France par M. Ramond. Cette marche régulière est souvent troublée en Europe où l'état de l'atmosphère est très-variable; mais, sous les tropiques, la période est beaucoup plus constante, et à tel point que, d'après M. de Humboldt, le baromètre pourrait servir à indiquer l'heure du jour.

Pour des observations sur la variation du baromètre dans un même lieu, le baromètre incliné est fort commode. La hauteur du mercure dans ce baromètre étant à la hauteur du baromètre vertical comme cos lcl' : 1. Les variations seront aussi plus grandes dans le même rapport (*fig.* 132 *bis*).

De la Machine Pneumatique.

241. La machine pneumatique, dont l'invention est due à Otho de Guérick, est un instrument propre à raréfier l'air contenu dans un espace déterminé. Dans son origine, elle était loin d'être ce qu'elle est aujourd'hui : elle con-

sistait simplement en un cylindre creux *A C* (*fig.* 133), appelé corps de pompe, dans lequel glissait à frottement un piston *P*, mû à volonté au moyen d'une tige *T*. A la base inférieure de ce corps de pompe, se trouvaient deux autres petits conduits : à l'un d'eux était adapté un robinet *R* parfaitement juste ; à l'autre, aussi muni d'un robinet *R'*, on vissait le col du récipient *B* dont on voulait raréfier l'air. Pour faire le vide dans ce récipient, on commençait par ouvrir le robinet *R*, et fermer le robinet *R'*, puis on abaissait le piston *P* jusqu'à la base inférieure du corps de pompe ; tout l'air qui se trouvait dans ce corps de pompe au-dessous du piston était contraint d'en sortir par la seule issue que lui présentait le robinet *R* ; alors on fermait le robinet *R*, on ouvrait le robinet *R'*, et on élevait le piston *P* dans le corps de pompe. L'ascension de ce piston formait nécessairement dans le corps de pompe un vide, et, par conséquent, l'air contenu dans le récipient *B*, par l'effet de sa propre élasticité, se répandait en partie dans cet espace vide. On fermait de nouveau le robinet *R'*, on ouvrait le robinet *R*, et on abaissait le piston. L'air qui s'était répandu dans le corps de pompe en était de nouveau chassé.

En élevant et abaissant ainsi plusieurs fois le piston dans le corps de pompe, et ouvrant et fermant alternativement les robinets *R* et *R'*, on parvenait à raréfier plus ou moins l'air contenu dans le récipient.

Mais l'embarras d'ouvrir et de fermer ainsi à chaque instant ces deux robinets était un grand inconvénient qu'il fallait faire disparaître ; on les a d'abord remplacés par deux soupapes *A* et *A'* (*fig.* 134), l'une placée dans le piston lui-même, l'autre dans l'intérieur du conduit du corps de

pompe destiné à communiquer avec le récipient *B*, et toutes deux s'ouvrant de dedans en dehors. Il est évident, d'après cette disposition même, que lorsqu'on abaissera le piston *P*, l'air qui se trouvera au-dessous de lui dans le corps de pompe, étant fortement comprimé, acquerra assez de force de ressort pour soulever la soupape *A*, et s'échapper par cette ouverture. Si maintenant on élève le piston *P*, la soupape *A* se fermera d'elle-même par l'effet de son propre poids; mais en vertu du vide qui s'est formé au-dessous du piston, l'air intérieur du récipient *B*, par sa force élastique, forcera la soupape *A'* à s'ouvrir, et se répandra en partie dans le corps de pompe. La soupape *A'* se refermera bientôt par son propre poids; ensuite on abaissera le piston *P*, la soupape *A* s'ouvrira pour laisser sortir l'air qui s'est répandu dans le corps de pompe, puis se refermera quand le piston *P* sera parvenu à la base inférieure du corps de pompe, et ainsi de suite.

242. La soupape *A'* présente un inconvénient que n'avait pas le robinet qu'elle remplace, c'est celui de ne plus se soulever après un certain nombre de coups de piston. On conçoit, en effet, que lorsqu'on aura poussé le vide assez loin, la force élastique de l'air intérieur du récipient *B* ne sera plus assez grande pour vaincre la résistance de cette soupape; on ne peut donc faire le vide au-delà de ce point où l'élasticité de l'air du récipient sera assez faible pour ne pas vaincre la résistance de la soupape. Aussi cette soupape n'est-elle plus en usage dans les machines pneumatiques : on la remplace par un petit cône tronqué solide qui remplit exactement l'ouverture de même forme que lui, du conduit qui communique au récipient; ce petit cône est fixé à l'extrémité d'une tige métallique *tt'* qui

traverse le piston à frottement (*fig.* 135). De cette manière, quand on baisse le piston, la tige *tt'* s'abaisse avec lui, amène le cône tronqué dans l'embouchure du conduit, et le piston surmontant le frottement de la tige *tt'* continue de s'abaisser; lorsqu'au contraire on élève le piston, la tige *tt'* s'élève avec lui, et le cône tronqué sortant de son embouchure donne un passage à l'air du récipient, quelque faible que soit la force élastique. Mais le piston *P* monte bientôt sans élever davantage la tige *tt'*, parce que cette tige ne tarde pas à rencontrer la base supérieure du corps de pompe, qui l'empêche d'aller plus loin. Enfin on a remplacé aussi la soupape *S* par une autre soupape métallique, fixée dans l'intérieur du piston, et qui se referme sur elle-même au moyen d'un petit ressort.

243. Cette machine n'est pas encore très-commode dans la pratique. Quand on commence à faire le vide dans le récipient, l'air intérieur qu'il contient ayant à peu près la même force élastique que l'air extérieur, on n'a aucune peine à soulever le piston. Mais lorsqu'on a fait le vide à un assez haut degré, l'air intérieur du récipient a une force élastique très-faible. Le piston doit soulever le poids de l'atmosphère; on voit qu'il faut faire un effort très-considérable pour l'élever dans le corps de pompe. On remédie très-bien à cet inconvénient dans les machines de ce genre que l'on construit aujourd'hui, en contrebalançant le poids de l'atmosphère par le poids de l'atmosphère lui-même. Pour cela, on se sert de deux corps de pompe que l'on fait communiquer tous deux par un même conduit avec le récipient (*fig.* 136). Ces deux corps de pompe sont parfaitement égaux; et, dans leur construction intérieure, ils ne diffèrent nullement du précédent; seulement les tiges des deux

pistons sont dentées et engrènent avec une même roue dentée, que l'on fait mouvoir au moyen d'un bras de levier *MM'*, dont le milieu est traversé par l'axe de la roue. Quand on saisit le bras de levier d'un côté, la roue dentée fait mouvoir à la fois les deux pistons; si l'un des pistons monte, l'autre descend. Comme l'atmosphère pèse également sur celui qui monte et sur celui qui descend, il en résulte qu'il y a compensation, et que l'effort nécessaire pour faire jouer cette machine n'est pas plus grand dans un temps que dans l'autre.

244. Quelle que soit la bonté d'une machine pneumatique, on ne parvient jamais à faire le vide entièrement dans le récipient, parce qu'à chaque ascension du piston, l'air contenu dans ce récipient, en quelque petite quantité qu'il soit, ne se répand jamais qu'en partie dans le corps de pompe; en outre, l'humidité qui peut se trouver adhérente aux parois intérieures de la machine fournit un peu de vapeur, et même, quand le vide est très-avancé, l'huile destinée à faciliter le jeu des pistons se réduit aussi à l'état gazeux.

Il est donc nécessaire de pouvoir juger à chaque instant du degré du vide. On peut le faire en établissant la communication entre l'intérieur du récipient de la machine et la partie supérieure d'un baromètre à cuvette ordinaire, et même ce baromètre fait partie de la plupart des machines que l'on construit aujourd'hui, mais il est disposé de telle manière qu'on peut le retirer à volonté. Lorsqu'on n'a pas encore commencé à raréfier l'air dans le récipient, cet air presse sur le mercure intérieur du tube barométrique avec autant de force que l'air extérieur sur le mercure de la cuvette, et le niveau est le même

dans le tube que dans la cuvette; mais à mesure que l'on fera le vide, la force élastique de l'air intérieur du récipient diminuant de plus en plus, le mercure montera nécessairement dans le tube, et comme il y monterait à la même hauteur que dans un baromètre libre si l'on faisait entièrement le vide, il en résulte que c'est la différence entre cette hauteur et la hauteur observée, qui mesure le degré du vide actuel. Soit h la hauteur du mercure dans le baromètre adapté à la machine; p la pression de l'atmosphère; l'élasticité de l'air intérieur sera $p-h$; avant qu'on eût raréfié l'air du ballon, il occupait le même volume sous la pression p; et comme les poids d'un même volume d'air sont proportionnels aux pressions, il en résulte que si 1 représente le poids de l'air primitif, $1 \times \frac{p-h}{p}$ sera le poids de l'air dilaté.

Il y a aussi des machines pneumatiques, dans lesquelles on juge du degré du vide, au moyen d'un instrument appelé *éprouvette* ou *baromètre raccourci*, que l'on renferme sous une petite cloche. Cette cloche est fixée hermétiquement sur un petit pied, creux intérieurement, de manière qu'étant vissé sur le tuyau même qui établit la communication entre les corps de pompe et le récipient de la machine, le même air qui est dans ce récipient se trouve aussi sous cette cloche. Voici maintenant ce que c'est que cet instrument : il se compose (*fig.* 137) d'un tube $B\ C\ A$, recourbé en forme de syphon, et haut environ de 8 à 10 pouces. L'une des branches $C\ B$ est fermée, l'autre est ouverte, et il y a du mercure en assez grande quantité pour que la branche fermée en soit entièrement remplie. Si l'on pouvait faire le vide parfaitement

dans le récipient, comme cet instrument communique avec lui, il est évident que le mercure viendrait de niveau dans les deux branches : car, puisqu'il laisse au-dessus de lui dans la branche fermée un espace complètement vide, il ne serait pas plus pressé d'un côté que de l'autre. Donc, à mesure que l'air se raréfiera dans l'intérieur de la machine, le mercure baissera dans la branche fermée; mais il sera toujours plus haut dans cette dernière que dans la branche ouverte, et la différence des niveaux, mesurée au moyen d'une échelle tracée à côté ou sur l'instrument, exprimera précisément le degré du vide dans le récipient.

245. On peut maintenant se proposer de calculer suivant quelle proportion on épuise l'air dans cette machine ainsi perfectionnée. Or, c'est un problème très-facile à résoudre quand on connaît le rapport de la capacité du récipient, y compris celle des tuyaux communicatifs, à la capacité de l'un des corps de pompe. Je dis, l'un des corps de pompe seulement : car les deux corps de pompe étant parfaitement égaux, et les pistons étant liés entre eux de telle manière que lorsque l'un est à son plus haut point dans son corps de pompe, l'autre est à son plus bas point dans le sien, il est évident que le volume de la quantité d'air que fait sortir chaque tour de la manivelle est égal à la capacité d'un des corps de pompe seulement (1).

---

(1) Soit donc $\frac{F}{P}$ le rapport connu de ces deux capacités, ce qui veut dire, en d'autres termes, que F étant la capacité du récipient, P sera celle de chacun des corps de pompe; soit A la masse de l'air contenu sous ce récipient. Si, pour plus de simplicité, on suppose que l'un des pistons étant à son point le plus bas, l'autre soit à son point le plus haut, ce dernier piston viendra, par un tour de manivelle, à son point le plus

Application.

246. Le rapport entre la capacité d'un des deux corps de pompe d'une machine pneumatique, et un ballon dans lequel on veut faire le vide, est 5 : 12. Le ballon contient $5^{lit},35$ d'air. On demande combien il restera d'air après huit coups de piston.

Voici le tableau des résultats après chaque coup de piston.

---

bas; et, comme le volume de la quantité d'air était $F + P$, puisque ce piston avait au-dessous de lui un volume P d'air, ce premier tour de manivelle aura fait sortir ce volume P d'air; et par la proportion $A : \varpi :: F + P : P$, on aura $\varpi = \frac{A\,P}{F+P}$ qui exprimera précisément la quantité d'air extraite par ce premier tour de manivelle, et par conséquent la quantité d'air qui restera sous le récipient sera égale à $A - \frac{A\,P}{F+P}$ ou bien $A\frac{F}{F+P}$. Le reste se trouverait aussi par la proportion $A : \varpi :: F + P : F$. En faisant faire un second tour à la manivelle, ce piston en s'abaissant fera encore sortir un volume d'air égal à P, dont le poids calculé au moyen de la proportion $\frac{A\,F}{F+P} : \varpi' :: F + P : P$ sera $\varpi' = \frac{A\,F\,P}{(F+P)^2}$. Par un troisième coup de piston on enleverait $\frac{A\,F^2\,P}{(F+P)^3}$.... et par n coups $\frac{A\,F^{n-1}\,P}{(F+P)^n}$. Le premier reste est $\frac{AF}{F+P}$; le second est $\frac{A\,F^2}{(F+P)^2}$; le troisième serait $\frac{A\,F^3}{(F+P)^3}$; et enfin le m^e $\frac{A\,F^m}{(F+P)^m}$. D'où l'on voit que pour avoir la quantité d'air restant sous le récipient après m tours de manivelle, il suffit de multiplier la quantité primitive par la puissance m^e du rapport des capacités du récipient à la somme des capacités de ce même récipient et d'un corps de pompe.

	Quantités extraites.	Restes.
	litres.	litres.
1er coup de piston.	1,573	2,776
2e.	1,111	2,666
3e.	0,784	1,882
4e.	0,553	1,328
5e.	0,391	0,938
6e.	0,276	0,662
7e.	0,195	0,467
8e.	0,137	0,330

Il reste après huit coups de piston $0^{lit.},330$.

On a calculé successivement les résultats partiels afin de mettre sous les yeux du lecteur la progression décroissante des quantités extraites et des quantités restantes; mais on aurait pu calculer immédiatement le dernier reste.

Pour s'assurer de l'exactitude des calculs, on ajoute les quantités extraites au dernier reste; on doit retrouver la quantité d'air primitive.

247. Les appareils que nous venons de décrire sont très-souvent employés en physique.

C'est surtout avec les machines pneumatiques qu'on peut faire une infinité d'expériences instructives; veut-on, par exemple, démontrer la nécessité de l'air dans la respiration des animaux ? on placera sous le récipient un oiseau, un cochon d'Inde; si l'on fait jouer la machine, on verra ces animaux haleter et bientôt mourir.

Veut-on encore prouver l'existence de l'air dans l'eau, et dans tous les liquides ? qu'on place sous le récipient l'un quelconque de ces liquides, on verra, dès les premiers coups de piston, l'air se dégager sous forme de bulles.

On pourra s'assurer, par le moyen de la machine pneumatique, que l'ébullition des liquides, sur les montagnes

élevées, est plus facile qu'à la surface de la terre. En effet, qu'on mette de l'eau tiède sous le récipient de la machine, on parviendra aisément à la faire bouillir, par un degré convenable de raréfaction de l'air. Si on laisse rentrer l'air, l'ébullition cesse à l'instant.

Nous avons dit que les gaz, en vertu de l'état répulsif de leurs molécules, tendent continuellement à se dilater. Un moyen simple de mettre cette propriété en évidence, est de placer sous le récipient une vessie fermée, de laquelle la presque totalité de l'air a été retirée : la vessie, à mesure qu'on fera le vide, se gonflera au point qu'elle finira par remplir complètement le récipient.

Des Machines à compression.

248. Les machines à compression sont absolument l'inverse des machines pneumatiques; celles-ci servent à raréfier l'air : celles-là au contraire sont destinées à le condenser dans un espace déterminé. La machine à compression (*fig.* 138) la plus simple, se compose d'un corps de pompe *A C*, dans lequel glisse à frottement un piston *P* entièrement massif. La partie inférieure de ce corps de pompe correspond à un petit conduit auquel se visse le récipient *B* dans lequel on veut condenser l'air. A l'entrée de ce conduit est une soupape *S* qui s'ouvre de haut en bas, et vers la partie supérieure du corps de pompe est pratiquée une petite ouverture *t* destinée à laisser entrer l'air extérieur. Par cette disposition on voit facilement que lorsque le piston *P* s'abaisse dans le corps de pompe, tout l'air qui se trouve au-dessous de lui, étant fortement comprimé, force la soupape *S* à s'ouvrir, et s'introduit

ainsi dans le récipient *B*. Mais sitôt qu'on élève le piston *P*, il se forme un vide dans le corps de pompe, la force élastique de l'air du récipient force la soupape *S* à se fermer sur elle-même; par conséquent cet air ne peut nullement s'échapper du récipient *B*. Quand le piston *P* est au-dessus de l'ouverture *t*, l'air extérieur se précipite dans le vide qui est au-dessous de lui, et le remplit complètement. Alors on abaisse de nouveau le piston, l'air contenu dans le corps de pompe s'introduit encore dans le récipient *B*, et en répétant cette opération un certain nombre de fois, on parvient à y condenser autant d'air que l'on veut.

249. Les corps de pompe que l'on construit aujourd'hui pour servir à la condensation de l'air, ne diffèrent du précédent qu'en ce que la soupape *S* est remplacée par une soupape mécanique, disposée de telle manière qu'elle s'ouvre de dehors en dedans, pour donner passage à tout ce qui tend à entrer dans le récipient *B*, mais se ferme aussitôt par l'action d'un petit ressort, et bouche le passage à tout ce qui tend à en sortir. L'ouverture pratiquée dans le corps de pompe lui-même est aussi remplacée par une soupape *S'* qui s'ouvre de l'extérieur à l'intérieur, afin de laisser entrer l'air, et qui se referme sur elle-même dès que l'air du corps de pompe a acquis un certain degré d'élasticité. Cette soupape se trouve dans le piston. (*Fig.* 138 *bis.*)

Enfin, pour rendre le jeu de la machine plus continu, on emploie deux corps de pompe qu'on lie ensemble, comme dans la machine pneumatique, au moyen d'une roue dentée; mais ici les deux corps de pompe ne rendent pas le même service que dans cette machine, car il est évi-

dent qu'il faut toujours un effort très-considérable pour condenser l'air extérieur dans le récipient : pour diminuer l'effort on réduit, autant que possible, le diamètre des pistons.

Afin de prévenir tout accident, si le récipient *m n* venait à se briser par l'effet de la condensation de l'air, on l'entoure d'un fort grillage et on le fixe entre deux plans de cuivre, que l'on serre fortement par des écrous (*fig.* 139).

Il est visible, d'après la construction de la machine à compression, qu'on introduit à chaque coup de piston la même quantité d'air. Au contraire, les quantités d'air extraites de la machine pneumatique, décroissent selon une progression géométrique assez rapide.

250. Pour juger du degré de condensation de l'air, le moyen qui se présenterait naturellement, serait de mettre en communication avec l'air du récipient la cuvette d'un baromètre dont le tube, ouvert par les deux bouts, plongerait par sa partie supérieure dans l'atmosphère. Avant de faire jouer la machine, l'air intérieur du récipient ayant la même force élastique que l'air extérieur, le niveau du mercure serait le même dans la cuvette que dans le tube; mais à mesure que l'on condenserait l'air, comme sa force élastique deviendrait de plus en plus grande, le mercure monterait aussi de plus en plus, et on reconnaîtrait, par exemple, que l'on a condensé la valeur d'une atmosphère, quand le mercure se serait élevé à 28 pouces, celle de deux atmosphères quand il serait à une hauteur de 56 pouces, et ainsi de suite.

Mais comme ce moyen exigerait un tube barométrique extrêmement long, on ne le met jamais en usage. On se

sert d'un instrument qui se compose d'une cuvette pleine de mercure, dans laquelle plonge un tube d'une certaine grandeur fermé par son extrémité supérieure, et rempli d'air à la pression ordinaire; on visse cet appareil sur le tuyau *C D* qui établit la communication entre les corps de pompe et le récipient de la machine, de manière que la cuvette ait seulement le contact de l'air du récipient, sans avoir aucune communication avec l'extérieur. Avant d'avoir fait jouer la machine, l'air intérieur de cette éprouvette ayant la même force élastique que l'air du récipient, le niveau du mercure est le même dans le tube que dans la cuvette. Mais à mesure que l'on opère la condensation dans le récipient, le mercure de la cuvette étant pressé par une force plus considérable, le niveau change, et il monte de plus en plus dans le tube. Or, au moyen de la différence des niveaux, on peut facilement juger du degré de condensation (1).

---

(1) Soit h cette différence : la force élastique de l'air intérieur du récipient fait équilibre à l'air du tube, plus à la colonne h; si donc nous représentons par P la force élastique primitive de cet air, laquelle n'est autre chose que la pression de l'atmosphère, V étant son volume primitif et V' son volume actuel, tous deux observés au moyen d'une échelle tracée à côté du tube ou sur le tube lui-même, $\frac{VP}{V'}$ sera, d'après la loi de Mariole, sa force élastique actuelle, et ainsi $\frac{VP}{V'} + h$ représentera celle de l'air intérieur du récipient; mais on sait que les quantités d'un même gaz pris sous le même volume sont proportionnelles aux forces élastiques; par conséquent, si nous représentons par A la quantité d'air renfermée dans le récipient

Du fusil à vent.

251. Ce fusil, comme l'indique son nom, doit ses effets à l'air condensé. Sa partie principale est une crosse en fer à l'entrée de laquelle se trouve une soupape élastique, qui s'ouvre de dehors en dedans. Pour charger ce fusil, on visse à l'entrée de cette crosse un corps de pompe analogue à ceux des machines à compression; puis, lorsqu'on a condensé dans la crosse une assez grande quantité d'air, on ôte le corps de pompe, et on met à sa place un canon en fer long de 4 pieds environ, et dans lequel on introduit une balle de son calibre, que l'on y bourre comme dans un fusil ordinaire.

Alors, pour faire partir ce fusil, on tire simplement avec le doigt un petit ressort adapté à la crosse : ce ressort fait ouvrir la soupape, et, par ce moyen, une partie de l'air condensé qu'elle retenait dans la crosse s'échappe, et chasse par son ressort la balle à une grande distance. Comme la soupape se ferme presqu'aussitôt qu'elle est ouverte, il n'y a qu'une partie de l'air condensé qui s'échappe; et, si cet air y a été refoulé en très-grande quan-

---

avant l'expérience, et par x la quantité qui y est condensée, la proportion $A : x :: P : \frac{VP}{V'} + h$, nous donnera $x = \frac{A\left(\frac{VP}{V'} + h\right)}{P}$ $= A\left(\frac{VP + V'h}{V'P}\right)$ ou bien en d'autres termes, on a condensé l'air dans le rapport de 1 à $\frac{VP + V'h}{V'P}$.

tité, on peut tirer un certain nombre de coups avec ce fusil, sans être obligé de le charger de nouveau.

Lorsqu'il se trouve quelque matière dure dans la bourre, comme du sable, du bois, on aperçoit un dégagement de lumière à la bouche du canon.

De la fontaine de compression.

252. Cette fontaine consiste en un vase de la forme *A B* (*fig.* 140), traversé en son milieu par un petit tuyau de cuivre entrant par l'ouverture *o*, qu'un robinet *R* ouvre et ferme à volonté, et se prolongeant jusqu'au fond; Ce tuyau se visse sur l'ouverture. On introduit de l'eau dans le vase, de manière à ne laisser vide que la partie supérieure *S*; pour cela on enlève le tuyau, qu'on remet en place aussitôt après. Ensuite on visse en *o* un corps de pompe pareil à celui du fusil à vent, et après avoir ouvert le robinet de communication *R*, on fait jouer le piston. L'air qu'il comprime pénètre par le tuyau dans le vase, et ajoute son élasticité à celle de l'air de l'intérieur de la fontaine, de sorte qu'en donnant un nombre suffisant de coups de piston, on peut condenser dans la partie supérieure *S* une très-grande quantité d'air. Cela fait, on ferme le robinet *R*, pour dévisser le corps de pompe, et on remplace ce dernier par un petit ajutage percé d'une ouverture étroite : si l'on ouvre le robinet *R*, l'air condensé au-dessus de l'eau, ayant une force de ressort supérieure à celle de l'air extérieur qui presse sur cette même eau, par l'ouverture du vase, l'en fait sortir sous la forme d'un jet, lequel s'élance d'abord à une assez grande hauteur, s'abaisse de plus en plus, à mesure que la force élastique de l'air intérieur diminue, et enfin cesse tout-à-fait.

DES POMPES.

253. La théorie des pompes se trouve naturellement placée à côté de celle du baromètre et de tous les appareils dont les effets sont dépendans du poids de l'atmosphère.

Il y a trois espèces de pompes ; la pompe aspirante, la pompe foulante, et la pompe foulante et aspirante, autrement dite pompe composée.

254. La pompe aspirante se compose d'un canal AB (*fig.* 141), appelé corps de pompe, dont l'extrémité inférieure plonge dans l'eau, et dans lequel on fait monter et descendre à volonté, au moyen d'une tige T, un piston P qui remplit exactement l'intérieur du corps de pompe. Ce piston est muni d'une soupape F qui s'ouvre de bas en haut; et dans l'intérieur du corps de pompe, à une distance du niveau de l'eau, moindre que 32 pieds, se trouve une seconde soupape F', qui s'ouvre dans le même sens. Quand on descend le piston P, la soupape F' se tient fermée par son propre poids, mais la soupape F est soulevée par la force élastique de l'air compris entre le piston et la soupape F', et cet air s'échappe. Quand on élève le piston P, il se forme un vide au-dessous de lui, la soupape F se ferme d'elle-même, tant par l'effet de son propre poids que par celui de la pression atmosphérique; la soupape F', au contraire, est soulevée par la force élastique de l'air compris entre elle et la surface de l'eau. Cet air se répand

donc en partie dans l'espace vide qui est au-dessous du piston P, et, sa force élastique diminuant nécessairement, la pression de l'atmosphère fait monter l'eau à une certaine hauteur dans la partie du corps de pompe située au-dessous de la soupape F'. Si l'on abaisse de nouveau le piston P, la soupape F' se fermera, la soupape F s'ouvrira, et l'air de l'espace FF' s'échappera. On relevera le piston P, la soupape F se fermera, la soupape F' s'ouvrira, et laissera passer au-dessus d'elle une nouvelle quantité de l'air qui se trouve au-dessous, ce qui fera encore monter l'eau dans le corps de pompe, et ainsi de suite. On conçoit que ce jeu continuel du piston fera bientôt monter l'eau au-dessus de la soupape F'. Ce piston étant alors amené en contact avec cette soupape, le liquide viendra au-dessus de la soupape F, une certaine quantité pourra être transportée, par ce piston, à telle hauteur qu'on voudra, et s'écouler par un tuyau latéral o.

Pour qu'une pompe aspirante soit propre à remplir son objet, il faut que la soupape F' du corps de pompe ne soit pas placée à plus de 32 pieds au-dessus du niveau de l'eau du réservoir; car au-delà de cette limite, on aurait beau faire le vide dans la partie M, jamais l'eau ne monterait jusqu'à la soupape F'; et cela parce que le poids de l'atmosphère ne peut faire équilibre qu'à une colonne de trente-deux pieds d'eau.

255. La pompe foulante se compose aussi d'un corps de pompe $A\ B$ (*fig.* 142), dans lequel monte et descend à frottement un piston P. Mais ce piston P est entièrement plein, et le tuyau par lequel s'écoule l'eau prend naissance à la partie inférieure du corps de pompe, et plonge même en partie dans le réservoir $m\ n$. A l'entrée de ce tuyau se

trouve une soupape F qui s'ouvre de l'intérieur à l'extérieur du corps de pompe, et celui-ci présente immédiatement au-dessous du tuyau latéral, une seconde soupape F' qui s'ouvre de bas en haut. Quand on abaisse le piston P, la soupape F' se tient fermée, et la soupape F s'ouvre pour laisser sortir l'air qu'il condense; quand on le relève, la soupape F se ferme, et, comme l'eau tend toujours à se mettre de niveau, la soupape F' s'ouvre, en laisse passer une certaine quantité au-dessus d'elle, puis se referme. On abaisse de nouveau le piston P, la soupape F s'ouvre aussitôt pour laisser passer l'eau, laquelle vient dans le tuyau latéral à une certaine hauteur. On continue ainsi de faire jouer le piston P; chaque fois qu'il s'élève, une certaine quantité d'eau arrive au-dessus de la soupape F; mais chaque fois qu'il descend, il refoule cette eau dans le tuyau latéral, de sorte qu'elle s'y trouve bientôt assez élevée pour s'écouler par l'orifice o. La pression atmosphérique ne joue aucun rôle dans cette pompe, de sorte qu'elle produirait les mêmes effets dans le vide, tandis que l'eau ne monte dans la pompe précédente que par le poids de l'atmosphère, et conséquemment elle ne produirait aucun effet dans le vide.

256. La pompe composée, ainsi appelée parce qu'elle réunit les effets des deux précédentes, ne diffère de la pompe foulante qu'en ce que la soupape F', et par conséquent le tuyau latéral, sont au-dessus du niveau de l'eau mn. Quand on abaisse le piston P (*fig.* 143), la soupape F' se tient fermée, et tout l'air qui est compris entre lui et cette soupape s'échappe par la soupape F. Quand on élève le piston P, la soupape F se ferme, la soupape F' s'ouvre, et l'air qui est compris entre elle et le niveau de l'eau se

répand en partie dans le vide formé au-dessous du piston. On voit donc qu'en faisant jouer suffisamment le piston *P* on parviendra bientôt à élever l'eau au-dessus de la soupape *F'*; de là on la refoulera dans le tuyau latéral au-dessus de la soupape *F*, et l'on pourra ainsi faire monter l'eau assez haut dans ce tuyau, pour qu'elle s'écoule par l'orifice *o*. Il est inutile de dire que, pour qu'on puisse faire usage de cette pompe, il faut, comme dans la pompe aspirante, que la soupape *F'* soit au-dessus du niveau de l'eau, à une hauteur moindre que 32 pieds.

Par l'addition d'un réservoir d'air au tuyau latéral, on rend le jet continu. L'eau, par ce jeu du piston, s'élève dans le réservoir *R* (*fig.* 144), et commence d'abord à y condenser l'air qui se trouve renfermé; au bout de quelques coups de piston l'eau sort par le tuyau *S*, et comme l'air presse continuellement sur la surface *A C* du réservoir, l'écoulement du liquide sera continu, tandis que dans la pompe précédente l'écoulement n'est produit que par l'abaissement du piston. La pratique apprend qu'il faut donner au réservoir à air une capacité égale à vingt-trois fois environ celle de la partie du corps de pompe parcourue par le piston. La pompe foulante, ainsi modifiée, peut servir avec avantage comme pompe à arroser les jardins, etc.

257. On a proposé diverses pompes à deux pistons. La suivante, imaginée par M. Richard Franklin, nous paraît une des plus simples et des plus ingénieuses. La figure 148 la représente.

a b est le levier qui sert à mouvoir les deux pistons *P* et *P'*; le point fixe du levier est en *c*; *b d* la tige attachée au piston inférieur *P'*; *c d* la tige attachée au piston *P*;

deux roues m et m', roulant sur elles-mêmes, maintiennent les pistons verticaux. La figure montre l'ascension du levier *a b* déterminé, fera monter le piston inférieur et descendre le piston supérieur; les soupapes des pistons, s'ouvrant de bas en haut, chaque piston en baissant laissera passer l'eau au-dessus de sa soupape, et la soulevera par son mouvement d'ascension. On a indiqué par *A B* le corps de pompe, par *H* le conduit plongé dans la pièce d'eau, enfin par *K* le tuyau de décharge.

258. *La pompe à incendie* en usage en France, se compose de deux corps de pompe, entre lesquels se trouve un réservoir à air (*fig.* 145). Cette pompe est placée dans un réservoir qu'on remplit d'eau; l'eau est aspirée par la pompe et refoulée dans le réservoir, d'où elle est poussée à l'aide d'un tuyau en cuir dans la direction voulue: des plaques en cuivre à jour, empêchent le gravier de pénétrer dans les corps de pompe. Souvent les corps de pompe sont disposés de manière à communiquer à volonté avec une pièce d'eau. Dans chaque corps de pompe et le conduit d'air, existe une soupape qui permet le passage de l'eau de la pièce d'eau dans le corps de pompe, et de celui-ci dans le réservoir.

De la fontaine intermittente.

259. Cette fontaine, comme l'indique son nom, ne coule que par intervalles; elle est de peu d'usage dans les arts, mais elle est très-ingénieuse; elle offre d'ailleurs une application des connaissances que nous avons acquises sur le ressort et la pesanteur de l'air. Le réservoir est ordinairement (*fig.* 146) un ballon de verre, traversé dans le sens

de son axe vertical par un tube métallique *A B*, dont l'extrémité supérieure est à une certaine distance de la partie la plus élevée du ballon, et dont l'extrémité inférieure, qui porte une petite échancrure, touche au fond d'une cuvette *C D*, percée en son centre d'un petit trou; ce tube, tenu dans une situation verticale par un cylindre métallique *E F*, dans lequel il s'emboîte, et qui est fixé à la cuvette *C D* par différens supports, entre dans le ballon par une ouverture cylindrique, qu'il ferme exactement. Enfin, autour de ce tube, le ballon est percé de plusieurs trous auxquels sont adaptés autant de petits tubes métalliques *t*, *t'*, *t''*.

On remplit le ballon presqu'entièrement d'eau par une ouverture *o*, que l'on referme ensuite. L'air intérieur faisant équilibre à la pression extérieure, le liquide s'écoule d'abord, en vertu de son propre poids, par les orifices *t*, *t'*, *t''* : de là il tombe dans la cuvette *C D*, et se rend dans le récipient placé au-dessous d'elle, en passant par l'ouverture pratiquée au centre de cette cuvette; mais, comme cette ouverture est telle, que dans un temps déterminé elle laisse couler moins d'eau que tous les tubes *t*, *t'*, *t''* à la fois, il arrivera nécessairement un instant où l'échancrure qui est au bas du tube métallique *A B* sera tout-à-fait obstruée par l'eau de la cuvette. Alors l'air extérieur ne pourra plus monter dans ce tube pour s'introduire dans le ballon.

Mais l'eau continuant toujours de s'écouler par les tuyaux *t*, *t'*, *t''*, l'espace qui est au-dessus, c'est-à-dire le volume de l'air qui la presse intérieurement, deviendra de plus en plus grand, et conséquemment sa force élastique s'affaiblira de plus en plus. Comme d'ailleurs les tubes *t*,

t', t'' sont très-étroits, on voit qu'après un certain temps, cette force élastique, ajoutée à la colonne d'eau qui reste dans le ballon, sera contrebalancée par la pression extérieure, et qu'alors l'écoulement cessera. Cependant l'eau s'écoulera de la cuvette CD; quand l'échancrure du tube AB sera dégagée, l'air extérieur s'introduira de nouveau dans le ballon; l'écoulement recommencera donc, et continuera jusqu'à ce que l'échancrure soit de nouveau obstruée par l'eau, auquel cas il s'arrêtera encore, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'eau dans le ballon.

Quand on fait l'expérience, on observe que l'écoulement de l'eau est presqu'immédiatement suivi de l'apparition subite d'une petite bulle d'eau qui s'élance du sommet du tube AB sur les parois du ballon. Cette petite bulle provient d'une goutte d'eau que l'air emporte en montant dans le tube, et l'écoulement commence avant qu'on ne l'ait aperçue, parce qu'à mesure qu'elle monte, elle refoule dans le ballon l'air qui se trouve dans le tube, et augmente sa force élastique suffisamment pour faire recommencer l'écoulement (1).

---

(1) La fontaine intermittente donne lieu à plusieurs problèmes fort intéressans, et dont la solution se trouve par l'application de ce qui précède. 1° Un cylindre fermé est rempli de mercure jusqu'à une certaine hauteur, et contient dans sa partie supérieure, de l'air sec, à la pression extérieure H. On demande combien il s'écoulera de mercure si l'on pratique une ouverture à la base. Soient A la hauteur totale du cylindre, B la hauteur du mercure, X la hauteur du mercure écoulé. On aura $B - X + H\left(\frac{A-B}{A-B+X}\right) = H$. 2° Résoudre la même question en remplaçant le mercure par l'eau. Nous supposerons les mêmes données; et de plus, nous admettrons qu'à la température de l'expérience, la

De la fontaine de héron.

260. Cette fontaine est encore assez curieuse. Elle se compose de deux ballons tenus l'un au-dessus de l'autre par un cylindre intermédiaire. Dans ce cylindre est un tube métallique qui établit la communication entre les deux ballons, et qui se prolonge dans le ballon supérieur jusqu'à une certaine distance de sa partie la plus élevée. Au-dessus est une cuvette *A B*, traversée en son centre par un tube vertical *o c*, qui plonge dans le ballon supérieur presque jusqu'au fond, et qui s'amincit par son ouverture supérieure *o*. Enfin, cette cuvette communique aussi au ballon inférieur par le moyen d'un tube latéral *H K*, qui plonge presque jusqu'au fond de ce ballon (*fig.* 147).

Quand on a rempli d'eau, jusqu'à un certain point, le

---

force élastique de la vapeur d'eau soit F. Il est clair que l'écoulement s'arrêtera quand l'élasticité de l'air sec diminuée par la dilatation, plus la force élastique de la vapeur qu'il renferme, plus la colonne d'eau, fera équilibre au poids de l'atmosphère. Or l'élasticité de l'air sec est $H - F$. L'agrandissement du volume se fait dans le rapport $\frac{A - B + X}{A - B}$; l'élasticité de l'air croîtra dans un rapport inverse, et sera $(H - F)\frac{(A - B)}{A - B + X}$. La force élastique de la vapeur est toujours F, puisqu'il y a assez d'eau pour saturer l'espace, à mesure qu'il devient plus grand par suite de l'écoulement de ce liquide. Comme les diverses élasticités, ainsi que la pression extérieure, sont exprimées par des hauteurs de mercure, il faut diviser la colonne d'eau restante par 13,586, densité du mercure. On aura donc l'équation $(H - F)\frac{(A - B)}{(A - B + X)} + F + \frac{B - X}{13,586} = H$.

Dans chacune de ces équations, tout est connu à l'exception de X ; on aura la valeur de cette inconnue par la résolution de ces équations.

ballon supérieur, l'air intérieur pressant absolument de la même manière sur sa surface que l'air extérieur auquel donne passage l'orifice *o*, on voit qu'elle a le même niveau dans le tube *o c* que dans le ballon. Mais si par le tube *H K* on verse de l'eau dans le ballon inférieur, l'air de ce ballon monte en partie dans le ballon supérieur, augmente la force élastique de celui qui y est renfermé; et, en vertu de cette force élastique, l'eau s'élevant dans le tube *o c*, s'échappera sous la forme d'un jet. Cette eau, à mesure qu'elle tombera dans le bassin *A B*, s'écoulera dans le tube *H K* et se rendra dans le ballon inférieur, ce qui entretiendra la force élastique de l'air intérieur des deux ballons: on voit d'ailleurs que le jet d'eau durera d'autant plus long-temps que la capacité du ballon inférieur sera plus grande par rapport à celle de l'autre ballon.

Presse hydraulique.

261. Pascal (*Traité de l'équilibre des fluides*) a eu la première idée de cet instrument. Un mécanicien anglais appliqua le principe de Pascal, vers 1796, à la construction de la presse hydraulique.

La figure 149 est une section verticale de cette presse.

A B C D est le cadre de la presse; *E F*, l'objet à comprimer; *H K*, une plaque de fonte pressée par un piston *P* contre une seconde plaque *M N*; *p*, piston de la pompe foulante qui sert à introduire l'eau destinée à pousser le piston *P* de la presse; *x z*, réservoir plein d'eau; *r*, arrêt pour limiter la course du piston *p*; *m*, soupape qui permet à l'eau d'entrer dans le corps de pompe dans le-

quel se meut p; elle s'ouvre du dehors en dedans. En n se trouve une seconde soupape par laquelle l'eau est injectée dans le canal $n\ l$; cette soupape s'ouvre aussi du dehors en dedans. On comprime d'abord l'objet le plus possible. Cette première opération est nécessaire afin d'éviter un travail long et pénible, la presse hydraulique ne comprimant que peu à la fois. Ensuite on fait mouvoir le piston p. A l'aide d'une disposition particulière on rend le mouvement de ce dernier vertical.

Pour empêcher l'eau de s'échapper par l'intervalle laissé entre le piston P et le cylindre qui l'enveloppe, on adapte une couronne en cuir, qu'on serre par un cercle métallique; ce dernier est tellement disposé, qu'il pénètre dans le cuir, et détermine un renflement. Par cette disposition, l'anneau pénètre d'autant plus dans le cuir, que la pression est plus forte.

Quand on veut retirer l'objet, on ouvre les soupapes n et m, et l'eau rentre dans le réservoir $x\ z$ par le canal $n\ l$.

Nous avons supposé un seul piston à la pompe foulante. Dans certaines presses, il y a deux pistons de diamètres différens. Quand le mouvement du plateau de la presse se ralentit, on arrête le jeu du grand piston, et l'on ne fait plus jouer que le petit.

Nous ne voulons donner qu'une idée de la presse hydraulique. *Voyez* pour plus de détails les traités de machines.

L'avantage de la presse hydraulique est de pouvoir exercer une pression très-forte à l'aide d'une force très-faible. Par un calcul assez simple, on se forme une idée de la force exercée sur la plaque $H\ K$.

Supposons que le piston p soit mu par un homme, à l'aide d'un levier; supposons que le rapport des deux bras de levier soit celui de 10 à 1 : l'effort d'un homme de moyenne force est au moins de 30 kilogr., ainsi la pression exercée sur le piston p sera égal à 30×10 ou 300 kilogr. La base du piston p est fort petite comparativement à la base P. So[illegible]rt $\frac{1}{20}$, d'après les propriétés des liquides (n° [illegible] pression exercée sur la base totale de P sera [illegible]ou 6000 kilogr. On peut beaucoup la multiplier e[illegible]dissant le bras du levier et la base du piston P.

MACHINES A VAPEUR.

262. Ces machines sont devenues, depuis un petit nombre d'années, d'une application si générale dans les arts, que leur histoire doit trouver place même dans les ouvrages élémentaires.

Le jeu de ces machines est fondé sur le développement de la force élastique de la vapeur d'eau par la chaleur.

Nous avons déjà vu que l'eau en ébullition, à l'air libre, donne une vapeur capable de vaincre la pression atmosphérique, ou, en d'autres termes, capable de faire équilibre à une colonne de trente-deux pieds d'eau; que cette force s'accroît rapidement avec la température, puisqu'elle est double à 122 degrés, triple à 135 degrés, etc. Il est tout naturel qu'on ait cherché à utiliser une force aussi grande.

La force motrice de la vapeur remplace généralement, avec une supériorité incontestable, la force de l'homme, des animaux, des eaux et des vents. L'emploi de cette

force motrice a produit une révolution dans toutes les parties de l'industrie.

263. Il existe plusieurs espèces de machines à vapeur, 1° les anciennes machines sont à simple effet; dans ces machines la vapeur n'agit que sur une face du piston; 2° les nouvelles machines sont à double effet; dans ces machines la vapeur agit alternativement sur les deux bases du piston; les machines en usage aujourd'hui, toutes à double effet, sont à basse, à moyenne ou à haute pression, selon que la vapeur dans la chaudière a une élasticité d'une, de deux, de trois, etc., atmosphères; 3° dans plusieurs machines, la vapeur, après avoir exercé sa puissance à une température peu différente de celle de la chaudière, se dilate sans recevoir de chaleur, et produit encore un certain effet. Ces machines sont appelées à *détente;* 4° enfin, dans la plupart des machines, la vapeur de l'eau est condensée par l'eau froide à sa sortie du piston, et, dans un petit nombre, elle s'échappe immédiatement dans l'atmosphère.

Nous nous bornerons à parler avec quelques détails des trois principales machines, 1° de Newcommen; 2° de Watt; 3° de Woolf. Ce que nous dirons de ces trois machines suffira pour faire comprendre toutes les autres.

Machine de Newcommen et de Cawley (*à simple effet*).

264. Pour donner d'abord une idée de l'emploi de la vapeur comme force motrice, nous supposerons qu'on veuille faire jouer le piston d'une des pompes que nous venons de décrire. Soit *P* ce piston qu'il s'agit de faire monter et descendre dans le corps de pompe *A B* (*fig.*

150). A cet effet, on attache la tige du piston à une chaîne qui s'enroule sur une des extrémités d'un levier arqué $CDC'D'$, mobile autour du centre O. Si l'on enroule une chaîne semblable à l'autre extrémité, il est visible qu'en tirant cette chaîne on fera monter le piston P et aspirer l'eau dans le corps de pompe AB; supposons maintenant que le p[illegible] P soit assez considérable pour qu'abandon[illegible]ne il parvienne au fond du corps de pompe, [illegible] sa soupape et pénétrera au-dessus, de sorte que s[illegible]re de nouveau la chaîne $C'D'P'$ on fera monte[illegible]n avec l'eau dont il est chargé, en même temps on aspirera une nouvelle portion d'eau dans le corps de pompe, et ainsi de suite.

Proposons-nous maintenant de faire monter et descendre le piston par le moyen de la vapeur seule. Nous placerons une chaudière à vapeur sous le corps de pompe $A'B'$. La température de cette vapeur sera égale ou supérieure à 100 degrés; elle peut être introduite à volonté dans le corps de pompe par le moyen d'un robinet R qui sert à établir la communication entre la chaudière à vapeur et le corps de pompe. Un petit canal latéral th, s'ouvrant de dedans en dehors, est destiné à donner issue à l'air qui se trouve sous le piston. Supposons le piston parvenu au plus bas point de sa course, il ne laissera au-dessous qu'un petit espace rempli d'air; si l'on ouvre le robinet R de la chaudière, la vapeur se précipitera dans le corps de pompe sous la base du piston, chassera l'air par le tuyau th, se dégagera aussi en partie par la même soupape, et, par sa force de ressort, fera monter le piston P'. Bientôt le contrepoids W fait descendre P et fait monter P'. Lorsque ce dernier piston est arrivé

au plus haut point de sa course, l'ouvrier ferme le robinet *R*, et en même temps introduit un courant d'eau froide par le tuyau latéral *v u*. Cette eau condense la vapeur; l'eau provenant de cette condensation, ainsi que l'eau d'injection, s'écoule par le tuyau *c z*; et comme l'air de la partie inférieure du corps de pompe a été expulsé, il se produit un vide à peu près complet. La *pression atmosphérique* agit sur la base du piston *P'*, le fait descendre et en même temps fait monter le piston *P*.

Le tuyau par lequel s'écoule l'eau du puits, est marqué par *K*; celui par lequel le réservoir *u* est entretenu plein, est désigné par *K'*.

La vapeur ne sert pour ainsi dire qu'à faire le vide sous le piston *P'*. C'est le poids de l'atmosphère qui le fait descendre, et conséquemment monter le piston principal *P*. C'est pourquoi on appelle cette machine *machine atmosphérique*.

L'eau a toujours au moins 100 degrés au moment où la vapeur se précipite sous le piston; sa température s'accroît pendant que le robinet *R* est fermé; sa force augmente aussi, et elle pourrait augmenter assez pour faire crever la chaudière. C'est pourquoi on adapte au haut de la chaudière une soupape *H* qui s'ouvre de dedans en dehors avec un effort connu et déterminé. Tant que la vapeur n'a qu'une force élastique égale à la pression extérieure, ou plus faible, la soupape reste fermée; mais si elle devient égale à la pression de l'atmosphère, plus à la résistance de la soupape, cette soupape s'ouvre, la vapeur se dégage et il n'y a point d'explosion à craindre. Mais comme la soupape pourrait bien ne pas céder au

moment opportun, il est bon de donner de la solidité aux chaudières.

265. Cette machine présente plusieurs inconvéniens graves; elle occasione une perte considérable de vapeur, puisque le piston et le cylindre étant refroidis à chaque instant par l'injection de l'eau froide, la vapeur, au moment de son entrée dans le cylindre, se condense en partie. Un second défaut de cette machine, c'est la nécessité d'un ouvrier pour fermer et ouvrir à propos le robinet d'injection et le robinet de la chaudière à vapeur, car dans une bonne machine l'action du premier moteur doit mettre toutes les pièces en mouvement sans aucun secours étranger. Dans les machines de Newcommen, qu'on trouve encore dans quelques exploitations, les robinets sont ouverts et fermés par la machine même. On rapporte qu'un enfant, chargé du soin d'ouvrir et de fermer les robinets, imagina un mécanisme qui le dispensa de son travail.

Cette machine, quoique très-imparfaite, est supérieure à ce qu'on avait imaginé d'abord. C'est la machine de Savery perfectionnée par Newcommen et Cawley.

Machine de Watt (basse pression).

266. Watt, constructeur d'instrumens à Glascow, eut l'occasion de soumettre la machine de Newcommen à des essais qui le conduisirent aux plus heureux résultats. Cet ingénieux mécanicien, frappé de la destruction de la quantité énorme de vapeur qu'occasionait l'injection d'eau froide dans le cylindre même, chercha les moyens d'opérer cette injection dans un vase séparé. [illegible]

denseur. Nous savons que si le condenseur est vide d'air et en communication avec le cylindre au moment de l'injection d'eau froide, la vapeur s'y précipitera complétement. Il ne s'agit plus que d'enlever l'eau et l'air du condenseur, afin de l'entretenir constamment vide. Une pompe aspirante, fixée à la machine, est chargée de ce soin. Dans ces premières machines, la forme du condenseur ne permettant pas l'extraction complète de l'air, on était obligé, à la reprise du travail, de laisser échapper de la vapeur qui chassait l'air à travers un tube appelé *reniflar*. Dans la machine précédente, la libre admission de l'air sur la surface du piston était nécessaire, et même, afin d'empêcher le passage de la vapeur entre le cylindre et le piston, on couvrait celui-ci d'une couche d'eau froide, qui dans le mouvement du piston mouillait et refroidissait le cylindre. La machine de Newcommen ainsi perfectionnée, était *à simple effet;* mais Watt conçut bientôt l'idée hardie de supprimer tout-à-fait la pression atmosphérique et de ne faire dépendre le mouvement du piston que de la force de la vapeur seule, en mettant successivement cette vapeur en communication avec l'une et l'autre de ses faces, et faisant au même instant le vide sur la face opposée. Il employa une vapeur d'une élasticité égale ou un peu supérieure à la pression atmosphérique, et, pour empêcher l'accès de l'air, il ferma le cylindre par un couvercle appliqué solidement. La tige du piston entre à frottement dans le milieu de ce couvercle. Ainsi, dans la machine de Watt, il y a économie de temps et de combustible, puisque chaque course du piston est active et qu'il n'y a pas de vapeur employée inutilement à maintenir le cylindre et le piston à un degré de chaleur élevé. Il paraît

que l'économie va jusqu'aux trois quarts de la vapeur exigée par la machine de Newcommen. Aussi Watt fit une très-grande fortune et acquit à son pays des avantages immenses sur les nations rivales. L'Angleterre reconnaissante vient de lui élever une statue.

267. On voit dans la figure 151, une coupe verticale de la machine de Watt, perfectionnée et telle qu'elle est aujourd'hui.

La vapeur passe de la chaudière dans l'intervalle laissé entre le cylindre *A A* et son enveloppe *C B*. Par le mécanisme d'une soupape à tiroir (voyez plus loin), elle vient alternativement au-dessus et au-dessous du piston *P*. La tige *T* du piston reste verticale par le moyen d'un parallélogramme *L K*. Le mouvement du piston se transmet au balancier *I H*; à ce balancier est fixée une bielle *M N*, qui fait tourner un arbre de couche *R*. Cet arbre porte un volant *S*, qui régularise son mouvement. Le mouvement rectiligne du piston s'est ainsi changé en un mouvement de rotation. Le régulateur est en *J*. (*Voyez* plus loin, régulateur.)

Pour faire monter et descendre alternativement le tiroir *E*, on a placé un excentrique sur l'axe du volant. Le collier métallique dans lequel se meut cet excentrique, est fixé à un triangle *z u c*. Le sommet de ce triangle est boulonné avec un levier coudé *s q r*. *q* représente l'axe fixe autour duquel tourne le levier. L'excentrique fait avancer et reculer l'extrémité *u* du triangle *z u c*, et imprime un mouvement de va et vient au levier.

L'extrémité *r* de ce levier fait monter et descendre la tige *E*. Le même levier fait fermer et ouvrir la soupape du condenseur, à l'aide d'un autre levier. De cette ma-

nière, à chaque précipitation de la vapeur dans le condenseur *O*, il s'y fait une injection d'eau froide. La pompe à air *t' p'* enlève l'eau du condenseur, et la porte dans un réservoir *a a'*, d'où, par le moyen de la pompe alimentaire *t p*, une partie passe dans la chaudière, et l'autre partie s'écoule au-dehors. Enfin le réservoir d'eau froide entretenu plein par la pompe *t'' p''*, communique avec un puits ou avec une source quelconque d'eau froide.

En *f'* est un clapet qui permet le dégagement de l'air de l'eau de condensation. Des ouvertures placées à des hauteurs convenables, empêchent que les réservoirs *a a'* et *b b'* ne soient jamais trop pleins.

Machine de Woolf (*à moyenne pression et à détente*).

268. Il existe des machines à deux cylindres dont l'invention date de 1781. A cette époque, Hornlower prit un brevet d'invention pour une machine à deux cylindres, agissant à une atmosphère. M. Woolf a employé depuis de semblables machines à la pression de deux à trois atmosphères (1). Dans ces sortes de machines la vapeur de la chaudière a une température supérieure à 100 degrés; les deux cylindres sont d'égale hauteur; leurs bases sont proportionnelles à l'expansion de la vapeur. Ainsi la force élastique de la vapeur dans la chaudière ou dans le petit cylindre, étant de trois atmosphères, le grand cylindre aura une base d'une dimension trois fois plus grande que

(1) MM. Steel et Aitkin ont modifié le système de Woolf, en employant trois cylindres au lieu de deux.

celle du petit, si l'on veut détendre jusqu'à une atmosphère environ, mais il y a avantage à porter la détente jusqu'à une demi-atmosphère. La température du condenseur étant de 40°, la perte, en pression, malgré la détente, se trouve encore de 0,07 d'atmosphère. Jusqu'à quel point est-il possible d'affaiblir cette perte par une plus grande expansion de la vapeur? C'est ce que la pratique peut seule apprendre.

269. Les deux pistons sont attachés à l'extrémité du même balancier, de sorte qu'ils s'élèvent et s'abaissent en même temps. La vapeur entre d'abord dans le petit cylindre, puis elle passe du haut du petit cylindre dans le bas du grand cylindre, et, au contraire, du bas du petit au haut du grand (*fig.* 152). La vapeur ne passe dans le condenseur qu'après avoir agi sur le petit et sur le grand piston. Pour maintenir la température des deux cylindres toujours à peu près au même degré, M. Woolf les enveloppe d'un troisième cylindre en fonte; deux tuyaux venant de la chaudière communiquent l'un à la partie supérieure de l'enveloppe, l'autre à la partie inférieure. C'est de cette enveloppe que la vapeur passe dans le petit cylindre. On a proposé d'échauffer cette enveloppe par un foyer particulier; mais ce projet n'a pas été appliqué.

Pour éviter toute perte de vapeur par le passage de cette dernière entre le piston et le cylindre, M. Woolf avait imaginé d'introduire la vapeur dans un cylindre isolé, et de la faire agir sur les pistons, par l'intermédiaire d'un liquide; mais cette modification n'a pas été exécutée en grand.

La vapeur agit d'abord sur le petit piston avec toute sa force, puis se dilate sous le grand piston, de manière

qu'au moment où elle pénètre dans le condenseur, sa température s'est beaucoup abaissée par suite de l'expansion.

270. Les machines à deux cylindres ont reçu diverses modifications. Nous joindrons ici la description de la machine que M. H. Edwards a importée en France.

Elle est vue de face dans la figure 153.

A A, plaque de fonte sur laquelle la machine est assise.

B B est le niveau du sol. On a supposé ici enlevés tous les massifs de maçonnerie établis en *A A* et en *B B*, afin de mettre à nu les diverses parties de la machine.

C C, balancier formé d'une seule pièce de fonte, supporté par un appui *a a* qui varie de forme selon la force de la machine et les localités.

D, volant en fonte, composé de six segmens assemblés par des boulons.

E, tuyau qui conduit la vapeur de la chaudière à la chemise enveloppant les deux cylindres.

F F, bielle qui transmet le mouvement à la manivelle du volant.

H H, parallélogramme de la tige du piston.

I, condenseur formé par le fond du cylindre de la pompe à air.

K L, tuyau qui conduit la vapeur du grand cylindre au condenseur.

M, petite pompe alimentaire qui puise une portion de l'eau du condenseur pour la porter dans la chaudière. L'excès de l'eau de condensation est versé au-dehors par la pompe à air; cet excès peut être utilisé pour des bains, etc. Un robinet *r* est destiné à régler la quantité d'eau chaude qui doit entrer dans la chaudière. Cette eau y est portée par le tuyau *r q*.

P, modérateur à force centrifuge.

Q R, levier qui communique du modérateur à la tige du robinet d'introduction de la vapeur.

Un robinet règle l'eau introduite de la bache dans le condenseur.

On n'a pas figuré de pompe à eau froide. Elle est analogue à celle de la machine précédente.

Depuis plusieurs années M. Edwards a introduit différentes améliorations de détails qu'il est impossible de faire connaître dans un ouvrage élémentaire.

Machines à haute pression.

271. Il existe aussi des machines à haute pression, dans lesquelles la vapeur a une élasticité de huit et même de dix atmosphères. Ces machines ont pour caractère d'agir sans condenser la vapeur. MM. Olivier Evans et Trevithick en ont établi un grand nombre en Amérique. Elles ont été employées avec succès dans les mines du Pérou. Elles sont surtout avantageuses pour les machines locomotives (charriots à vapeur) : les chaudières de ces sortes de machines doivent être très-solides ; la vapeur passant dans l'atmosphère à une température élevée, la perte de force est considérable ; cette perte pourrait être diminuée par l'emploi de la détente.

272. Après avoir fait connaître les principales machines à vapeur, il est utile de donner quelques détails sur les parties les plus importantes de ces machines. Telles sont, le modérateur, les soupapes de sûreté, les soupapes pour le passage de la vapeur ou de l'eau, le condenseur, la chaudière, le manomètre, le volant, le piston, le balancier.

Modérateur.

273. La figure 154 représente cette partie importante d'une machine à vapeur. Le modérateur sert, comme nous l'avons dit, à régler l'ouverture de la soupape d'introduction de la vapeur.

Le piston du cylindre communique à la tige *a b* un mouvement de rotation; une bride *c d*, fixée sur la tige *a b*, percée en *e* et en *d*, reçoit les leviers *t p* et *q h*; la couronne *m n* porte un cylindre creux qui glisse à frottement, et peut soulever le levier *r v*, auquel est fixé le robinet d'introduction. Si le mouvement de rotation de l'axe *b* s'accélère, la force centrifuge éloigne les masses *h* et *p*, la couronne *m n* s'abaisse, et par suite le robinet tourne de manière à laisser entrer moins de vapeur. La diminution du mouvement de l'axe *a b* produit un effet contraire.

Piston.

274. Le piston le plus communément employé se voit dans la figure 155. Il consiste en deux plaques *m n* et *e q*, fixées l'une à l'autre à l'aide de vis; l'intervalle *A B* des plaques est rempli avec de la filasse imprégnée de suif; à mesure que la filasse est usée, les plaques sont rapprochées.

Ce piston convient dans les machines à basse pression; mais dans les machines à haute pression, dans lesquelles la filasse est rapidement usée, on l'a remplacé avec avantage par un piston métallique.

La fig. 155 *bis* donne une section du piston métallique le plus avantageux. Ce piston est composé de six pièces de

cuivre; trois pièces *A*, *B* et *C* sont des segmens; entre les segmens sont des coins *a*, *b* et *c*; des ressorts serrent les coins et les segmens contre le corps de pompe; à mesure que les segmens s'usent, les coins, poussés par les ressorts, entrent plus avant, et rendent toujours le piston parfaitement cylindrique. Des pistons de ce genre peuvent servir plusieurs années sans réparations.

Soupapes pour le passage de la vapeur.

275. La figure 156 fera concevoir le jeu des soupapes, à l'aide desquelles la vapeur passe de la chaudière dans le cylindre, et de celui-ci dans le condenseur.

Le tuyau qui conduit la vapeur de la chaudière sous le piston est désigné par *A*; *B C*, le tuyau aboutissant au condenseur *D*; *m n* et *p q*, deux boîtes partagées chacune en trois compartimens, dans lesquels sont les soupapes *a*, *b*, *c*, *f*, s'ouvrant par le haut; chaque boîte communique avec le fond et le haut du cylindre. Dans le compartiment du milieu de chaque boîte, est une communication en *k* et en *l*, qui répond au haut et au bas du cylindre. La vapeur arrive par le tuyau *A* dans la chambre supérieure de la boîte *m n*, et passe par le tuyau *E* dans la chambre supérieure de la boîte d'en bas.

La soupape *a* étant ouverte, le dessous du piston sera en communication par l'ouverture *l* et le tuyau *B C*, avec le condenseur *D*; dans le même moment la soupape *b* étant ouverte, la vapeur passera du centre de la boîte d'en haut, au-dessus du piston, par l'ouverture *k*. Si les soupapes *a* et *b* sont fermées, et que les soupapes *f* et *c* soient ouvertes, la vapeur de la chaudière arrivera au-dessous du

piston par l'ouverture *l*, en sorte que pendant que la vapeur de la partie supérieure du cylindre est en communication avec la chaudière, la partie inférieure communique avec le condenseur.

On a imaginé diverses soupapes. Nous citerons particulièrement les soupapes à *coulisse* ou à *tiroir;* ces dernières présentent l'avantage important de se conserver beaucoup plus long-temps : le frottement qu'elles éprouvent ne les rend que plus propres à remplir leur objet, elles sont généralement employées dans les nouvelles machines. On en voit un dessin dans la figure 156 *bis*.

La vapeur arrive par le tuyau *T*. *A B C D*, caisse qui en renferme une seconde *E F*. Cette dernière glisse à frottement contre *A I D*, au moyen de la tige verticale *H K*, qui traverse en *K* une boîte imperméable à la vapeur. Trois conduits *P S*, *P' S'* et *R V*, partent de la boîte *A B C D*. Le premier communique avec la partie supérieure du cylindre; le second avec la partie inférieure, et le troisième, avec le condenseur. La vapeur de la chaudière se rend au-dessus du piston par *P S*, et la vapeur du dessous du piston passe dans le condenseur par le tuyau *V R* et *P' S'*. Si la boîte *E F* monte, la vapeur de la chaudière communiquera par *P' S'* avec le dessus du piston, etc.

Soupapes de sûreté.

276. Les soupapes de sûreté consistent en général en une plaque métallique, s'appliquant exactement sur l'ouverture rodée d'une tubulure de la chaudière (*fig.* 157). On peut charger plus ou moins les soupapes. Elles sont destinées à laisser échapper la vapeur aussitôt que

son élasticité aura atteint une certaine limite qu'on ne veut pas dépasser. Chaque chaudière a une épaisseur déterminée, et qui est capable de supporter telle ou telle pression ; cette épaisseur augmente à mesure qu'on veut opérer à une pression plus élevée. Les ouvriers chargent souvent imprudemment les soupapes ; l'autorité, sur un rapport de l'Académie, a arrêté que chaque chaudière aurait deux soupapes, dont une serait sous clef; enfin dans la crainte que ces soupapes, privées par un long usage d'une partie de leur mobilité, ne jouassent pas au moment opportun, il a été ordonné que chaque chaudière présenterait encore deux rondelles d'alliage, fusibles à une température déterminée. On sait que l'étain, le bismuth et le plomb forment par leur combinaison un alliage fusible à 100 degrés, à 110, etc., selon les proportions. L'emploi de ces rondelles fusibles a fait naître des objections, que nous ne pouvons pas examiner ici.

La plus sûre des soupapes serait peut-être un tube plein de mercure, adapté à la chaudière, semblable aux tubes à boules des appareils de chimie (*fig.* 158). M. Edwards fait des essais sur ce sujet.

Enfin il nous semblerait encore plus facile de faire plonger dans un bain de mercure un tube recourbé de la forme (*fig.* 158 *bis*). Ce tube présenterait un espace *A B* assez considérable pour recevoir tout le mercure dans le cas d'absorption. On trouverait facilement un endroit pour placer ce tube à côté de la chaudière. Il est bien entendu que ce moyen n'est applicable qu'aux machines dont la pression ne dépasse pas trois à quatre atmosphères.

Chaudières.

277. Les chaudières sont en cuivre, en tôle ou en fonte.

Dans les anciennes machines elles présentent une forme presque sphérique au-dehors, et un plan dans la partie en contact avec le foyer. Depuis plusieurs années elles ont été singulièrement modifiées et perfectionnées.

Dans la machine à détente, la chaudière consiste en deux tuyaux de fonte cylindriques placés horizontalement à côté l'un de l'autre, et au-dessous d'une chaudière également cylindrique, mais cinq à six fois plus large (*fig.* 159). Au centre de la chaudière supérieure, ou réservoir de vapeur, est une ouverture *m* assez grande pour permettre à un ouvrier d'examiner, dans le besoin, l'intérieur de la chaudière. Plusieurs autres ouvertures plus petites sont pratiquées pour les soupapes de sûreté, les rondelles fusibles, et l'introduction de l'eau chaude.

Ces chaudières sont assez employées aujourd'hui. Ajoutons que la flamme, après avoir chauffé les bouilleurs, passe autour de la majeure partie du grand cylindre.

Dans d'autres systèmes on a multiplié les bouilleurs. Les petits tubes sont surtout nécessaires dans les machines à haute pression, parce que la résistance de ces tubes est en raison inverse du diamètre.

La figure 160 offre une chaudière d'une machine à basse pression avec tous ses accessoires.

Manomètre.

278. Le manomètre des machines est un tube de Mariotte en communication avec la chaudière, et scellé dans un mur du lieu de la machine (*fig.* 161). Le tube se crasse et est hors d'usage au bout de quelque temps; mais il présente un autre inconvénient plus grand, c'est qu'il ne donne qu'inexactement la pression de l'intérieur

de la chaudière, parce que, le tube de verre étant inégalement pressé au-dehors et en dedans, cède; et son volume s'agrandit. Il nous semble qu'il serait utile de remplacer cette éprouvette par un tube ouvert (*fig.* 162), pour les machines à moyenne et à basse pression : la hauteur du mercure dans le tube ouvert, augmentée de la hauteur du baromètre à l'extérieur, représenterait la pression de l'intérieur de la chaudière. Pour les machines locomotives à haute pression, ne serait-il pas convenable de faire usage d'une éprouvette (*fig.* 162 *bis*), dans laquelle le tube renfermant l'air, étant également pressé en dedans et au-dehors, indiquerait exactement les pressions; s'il s'agissait d'une détermination très-exacte, on pourrait tenir compte de la compression du verre; on néglige toujours cette dernière correction, la compression du verre étant infiniment plus petite que la compression des gaz.

Du Volant.

279. Watt a employé avec avantage le volant, pour régulariser le mouvement des machines à vapeur. Sans le volant, ces machines ne pourraient guère servir qu'à mettre en jeu les pompes destinées à élever l'eau.

Le volant n'augmente pas la force effective de la machine, et même il la diminue d'une quantité dépendante du frottement de son axe, et de la résistance qu'éprouve son mouvement dans le milieu environnant; mais il est propre à régulariser le mouvement.

Le volant le plus généralement employé aujourd'hui est celui qu'indique la figure 151.

On trouve encore aussi quelques machines où le volant a la forme représentée dans la figure 163.

Quelles sont les dimensions à donner au volant dans les différentes machines? C'est une question qui sort du plan que nous nous sommes tracé. (*Voyez* les additions à l'ouvrage de Belidor, où M. Navier traite cette question à fond.)

Du Balancier.

280. Une condition importante à remplir, et sans laquelle la destruction de la machine serait prompte, est de rendre le mouvement du piston rectiligne.

Dans les anciennes machines, on y parvient en adaptant à la tige du piston une chaîne de Vaucanson qui s'enroule sur l'extrémité du balancier, comme on le voit dans la machine de Newcommen (*fig.* 150). Dans les machines à double effet, où la tige du piston est poussée avec la même force dans son ascension et dans sa descente, un autre mode de conserver le mouvement rectiligne devenait nécessaire; on l'a obtenu par le parallélogramme. Les figures 151 et 153 en présentent un modèle.

La figure 164 représente un mode plus simple et employé avec succès dans les machines peu considérables. Une bielle attachée à l'extrémité du balancier porte deux galets, un de chaque côté, qui pressent sur les montans *A A*, et maintiennent le piston dans une direction verticale.

281. Quels sont les avantages des diverses machines à vapeur? Les machines à vapeur, comme nous l'avons dit, sont de quatre espèces, de Newcommen, de Watt, de Woolf, d'Évans et Trevithich. Le désavantage des premières est évident. Il ne reste plus qu'à comparer les trois autres espèces de machines, c'est-à-dire les machines à basse, à moyenne, et à haute pression.

La théorie et la pratique semblent d'accord sur ce point. Les machines qui présentent le plus d'avantages aujourd'hui, sont les machines à moyenne pression et à détente; ce fait paraît bien démontré par l'état comparatif des effets des machines dans les mines de Cornouailles. Il y a dans ces mines un grand nombre de machines de Watt et de Woolf. Ces dernières l'emportent de beaucoup.

Dans les machines de Watt perfectionnées, un boisseau de charbon élève 20,500,000 livres d'eau à un pied de hauteur. Dans les machines de Woolf, le produit l'emporte de plus de 30 pour 100. (Rapport de M. C. Dupin à l'Académie.)

Cette comparaison n'a pas été faite pour les machines à haute pression sans détente; mais comme la vapeur passe immédiatement dans l'atmosphère, sans détente, une quantité de combustible donnée doit produire moins d'effet dans ces machines que dans les machines de Watt et de Woolf, avec détente.

Voyez les tableaux publiés par M. Clément.

Les machines à vapeur des différens systèmes exigent pour leur service des quantités d'eau plus ou moins grandes.

La quantité d'eau que les machines à vapeur exigent pour leur service, est *d'autant plus grande*, qu'elles sont *plus puissantes;* elle est dans tous les cas assez considérable pour qu'on ne puisse pas la *transporter* sur place, comme on le fait pour le combustible. En conséquence, il peut arriver qu'il y ait assez souvent impossibilité d'employer ces machines dans les lieux qui seraient cependant les plus convenables pour des exploitations, etc., surtout lorsque celles-ci exigent des machines d'une grande force.

M. Madelaine, capitaine d'artillerie, est parvenu à faire servir de nouveau l'eau de condensation en la refroidissant; il a pu ainsi alimenter sans difficulté une machine de la force de six chevaux avec $\frac{1}{10}$ seulement de la quantité d'eau qui aurait été nécessaire. D'après M. Madelaine, *un dixième* représente même une limite qu'on n'atteindrait pas pour des machines de plus en plus puissantes. Nous sommes obligés de renvoyer pour la description du moyen employé, à un Mémoire inséré dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, du mois de juin 1827.

282. On compare ordinairement la force d'une machine à vapeur, à la force d'un cheval. La force attribuée à un cheval n'est pas la même dans tous les pays. M. Navier, en combinant les résultats les plus dignes de confiance, a trouvé qu'on pourrait représenter la puissance mécanique d'un cheval attelé à un manége, marchant au pas, et travaillant huit heures sur vingt-quatre, par $40\frac{1}{2}$ kilog. élevés à un mètre de hauteur en une seconde de temps. L'unité dynamique, ou force de cheval de *feu*, est variable pour les différens constructeurs; tantôt elle est portée à 60, 70, 75 et 80 kil. Une machine à vapeur de six chevaux sera une machine capable de faire six fois ce travail. Les besoins ordinaires n'exigent que des machines de six à dix chevaux, mais il y en a de cinquante, de cent, et davantage. On voit même, dans les mines de Cornouailles, des machines qui ont la puissance de cinq cents chevaux.

L'unité dynamique, adoptée pour la mesure de la puissance des machines, n'ayant rien de précis ni de légal, pourrait souvent donner lieu à des contestations; il était

à désirer qu'on eût un moyen simple et rigoureux de mesurer cette puissance. Voici celui qu'a proposé M. Prony.

Ce savant géomètre fixe à l'essieu du volant de la machine à vapeur, dont il veut connaître la puissance, un appareil auquel il donne le nom de *frein* (*fig.* 165). Les parties CF et CF' se font équilibre, c'est-à-dire que leur centre de gravité passe par le centre de l'axe; mais le poids additionnel P tend à faire tourner le frein en sens opposé du mouvement du volant indiqué par la flèche. Pour l'expérience, on suppose le frein serré sur l'essieu, de telle manière que pendant le mouvement de cet essieu la branche CF se tienne horizontale, condition qu'on remplit à l'aide des boulons $b\,b$, $a\,a$.

La question se réduit à déterminer *l'effet dynamique* produit quand le frein est rendu horizontal pendant le mouvement de la machine (1).

---

(1) Soient P le poids suspendu au point H;

R la distance entre le centre de gravité de ce poids, et l'axe de l'essieu; r le rayon de l'essieu; π le rapport de la circonférence au diamètre;

Q l'*unité dynamique*, égale à un poids convenu, multiplié par une hauteur également convenue, à laquelle on suppose ce poids élevé pendant l'unité de temps;

M le nombre d'*unités de force* mesurant l'effet *dynamique*, qu'il s'agit de déterminer.

M. Prony, à l'aide de quelques considérations mathématiques, parvient à la relation $M = \frac{2\pi NPR}{Q}$, dans laquelle π, P, R, Q, sont connus. Quant à N, il est égal à K, nombre de révolutions dans un temps donné, divisé par le nombre d'unités de temps; on a $\frac{K}{T} = N$. (Voyez *Ann. des Min.*, t. XII, p. 91.)

Calcul des effets dynamiques des machines à vapeur.

283. On est convenu de prendre pour unité dynamique un mètre cube d'eau élevé à un mètre de hauteur. Pour les machines à condensation sans détente, le calcul de l'effet se fait d'une manière fort simple.

Soit T la température de la vapeur de la chaudière; soit H la force élastique de la vapeur à cette température; soit t la température du condenseur, et h la force élastique correspondante; soit B la base du piston, L sa course, ce piston sera poussé par BLH moins BLh, ou $BL(H-h)$ (a).

Si B et L sont exprimés en mètres, et H et h en hauteurs d'eau, le résultat sera le nombre de mètres cubiques d'eau élevés à un mètre de hauteur.

Le calcul pour les machines à détente peut se faire très-approximativement, à l'aide des principes élémentaires. Soient b la base du petit piston; l sa course; $H_{,}$ l'élasticité de la vapeur dans la chaudière et dans le petit cylindre; $H_{,,}$ l'élasticité dans le grand cylindre : après la détente totale, on aura, pour la pression exercée sur le petit cylindre, $bl\left(H_{,}-\frac{H_{,}+H_{,,}}{2}\right)$.

La pression exercée sur le grand cylindre sera $BL\left(\frac{H_{,}+H_{,,}}{2}-h\right)$. On aura, pour la force totale imprimée aux deux pistons par la vapeur,

$$bl\left(H_{,}-\frac{H_{,}+H_{,,}}{2}\right)+BL\left(\frac{H_{,}+H_{,,}}{2}-h\right)\ (b):$$

Il faut se rappeler que ce calcul n'est qu'une approximation. La vapeur dans le petit cylindre n'a pas tout-à-fait la même élasticité que dans la chaudière; d'une autre part, les moyennes arithmétiques ne sont pas non plus très-rigoureuses. Enfin, pour faire le calcul, on devrait déterminer $H_{,,}$ en admettant que la vapeur suive la loi de Mariotte dans sa dilatation (ce qui n'est pas démontré, et ce qui est probablement très-éloigné de la vérité à des pressions même peu élevées), c'est-à-dire qu'on ait $H_{,} : H_{,,} :: BL : bl$, d'où $H_{,,} = \frac{H_{,} bl}{BL}$ ou $= \frac{H_{,} b}{B} L$, (B et l étant en général égaux). Cependant ce calcul suffit pour donner une idée de l'avantage de l'emploi de la détente de la vapeur.

Application. Soit $B = 24$; $b = 10$; $T. = 140°$; $t = 35°$.

La table du n° 96 dont $H_{,} = 2^{m},66$, et $h = 0^{m},040$.

En multipliant $H_{,}$ et h par 13,586, densité du mercure, on aura les hauteurs en eau.

On trouvera à l'aide de ces données, et par les formules (a) et (b), le rapport entre les effets dynamiques d'une machine de Watt sans détente, et ceux d'une machine de Woolf avec détente.

284. *Détermination du maximum d'effet que peut produire la quantité de vapeur formée par la combustion d'un kilogramme de charbon, dans une machine ordinaire.*

$H_{,}$ la pression de la vapeur dans le cylindre,
$H_{,}$ la pression dans le condenseur, } en hauteurs d'eau;

P le poids d'un mètre cube d'eau, à la même densité que celle qui donne les hauteurs H_0 et H_1;

V_0 le volume de la vapeur; l'effet de cette vapeur est donné par la formule $P\,V_0\,H_0 - P\,H_1\,V_0$, ou bien $P\,H_0\,V_0\left(1 - \frac{H_1}{H_0}\right)$; c'est-à-dire, la pression exercée sur l'une des bases du piston par la vapeur de la chaudière, moins la pression exercée par la vapeur du condenseur.

$1 - \frac{H_1}{H_0}$ est connu en nombres; il ne reste à calculer que $P\,H_0\,V_0$; dans cette expression, il n'y a que V_0 inconnu. Il ne s'agit donc que de trouver V_0, ce qu'on peut aisément faire, par ce qui a été dit sur les vapeurs et les gaz. Si l'on appelle H la pression, et V le volume de la vapeur à 100°. On a (n° 63) $\frac{H_0}{H} = \frac{V}{V_0}\frac{(1 + 0{,}00375\,t)}{1{,}375}$; par conséquent $P\,H_0\,V_0 = P\,H\,V\frac{(1 + 0{,}00375\,t)}{1{,}375}$. Reste à calculer V ou le volume de vapeur à 100°, qu'on peut faire avec un kilogramme de charbon en prenant l'eau à la température du condenseur. Un kilogr. de charbon pur dégage 7914 degrés de chaleur; et en supposant l'eau à 30 degrés au moment où elle entre dans la chaudière, on trouve qu'un kilogr. de charbon volatilise $13^k{,}1$, sous 0^m76; ainsi l'on aura

$P\,H_0\,V_0 = P\,0{,}76 \times 13{,}1\,\frac{(1 + 0{,}00375\,t)}{1{,}375}$, où tout est connu. $P\,H_0\,V_0\left(1 - \frac{H_1}{H_0}\right)$ devient donc

$$\left(1 - \frac{H_1}{H_0}\right) P.\ 0{,}76.\ 13{,}1\ \frac{(1 + 0{,}00375\,t)}{1{,}375}.$$

Voilà la puissance mécanique de la quantité de vapeur que produit un kilogr. de charbon, exprimée en kilogr., et agissant dans une machine sans détente, dans laquelle l'eau de l'entrée de la chaudière est à la température de 30°. Le nombre 7914° est celui dont, d'après mes expériences, s'élève un kilogr. d'eau par la combustion d'un kilogr. de charbon pur. Le nombre adopté dans tous les écrits relatifs aux machines à vapeur, varie de 7000 à 7050 degrés. Ce nombre est, selon nous, trop faible. La combustion de la houille nous paraît même devoir dégager plus de 7914 degrés de chaleur. Cette substance renferme, il est vrai, $\frac{1}{20}$ environ de matières terreuses; mais l'hydrogène dont elle n'est jamais exempte, compense bien le $\frac{1}{20}$ de matière inerte.

285. Les calculs pour déterminer d'une manière rigoureuse l'effet que peut produire la vapeur produite par la combustion d'un kilogramme de charbon, sont trop compliqués pour que nous les rapportions ici. (Voyez *Ann. min.*, t. 9; un Mémoire de M. Combes, etc.)

Bateaux à vapeur.

286. L'application des machines à vapeur à la navigation, ne date pas de très-loin. Jonathan proposa les bateaux à vapeur en 1736; Perrier en exécuta un sur la Seine en 1775; mais c'est le mécanicien Soulton qui le premier remplit les conditions exigées pour la vitesse de ces bateaux.

Cette nouvelle application de la science est mise en pratique en Amérique depuis 1807, en Angleterre depuis 1812, et en France depuis 1816.

Les roues des bateaux à vapeur sont à aubes. Le mou-

vement de rotation est imprimé aux roues à l'aide d'un arbre de couche qui reçoit son mouvement directement ou indirectement de la bielle. A cause du peu de hauteur des bâtimens à vapeur, le balancier est placé en bas; quelquefois une seule roue détermine le mouvement du bâtiment; le plus souvent il y en a deux sur les côtés. L'arbre des roues tantôt est placé transversalement au milieu, tantôt en est éloigné à une certaine distance. Comme dans toutes les machines à vapeur on régularise le mouvement à l'aide d'un volant; deux machines à vapeur peuvent y suppléer. Par exemple, le bâtiment qui va de Paris au Havre possède deux machines à simple pression (de la fabrique de Charenton). Le piston de l'une de ces machines monte quand le piston de l'autre descend, et réciproquement. De cette manière le mouvement de l'arbre de couche est rendu régulier sans le secours d'un volant.

La machine à simple pression est la plus communément employée. Il serait économique de faire usage de la détente. Une machine à pression moyenne ou à haute pression offrirait l'avantage d'occuper moins d'espace, mais elle présenterait aussi plus de chances de danger.

Nous ne faisons que donner ici une idée très-succincte des bateaux à vapeur.

(*Voyez* l'ouvrage de M. Marestier, le cours de M. Dupin, une note de M. Molard. *Ann. ch. et ph.*, t. 23, etc.)

Voitures à vapeur.

287. MM. Trevithich et Vivian firent marcher des voitures à vapeur sur des routes-ornières de Merthyn-Tydvil.

M. Blenkinsop introduisit l'usage des ornières et des roues dentées; dans ce système on n'a pas à craindre de voir glisser la voiture sur les pentes. MM. Edwards et William Chapman ont imaginé des systèmes particuliers.

Armes à vapeur.

288. M. Perkins, en Angleterre, a fait des essais pour lancer directement des projectiles par l'élasticité de la vapeur; il est parvenu à lancer un nombre considérable de balles avec une très-grande rapidité. Ces balles avaient assez de force pour percer à une grande distance des planches de sapin d'onze lignes d'épaisseur. Les balles placées dans une espèce de trémie, tombaient dans le canon; et au même instant la vapeur les chassait par son élasticité.

Cet ingénieur espérait pouvoir lancer, par le même moyen, des boulets de différens calibres; mais M. le capitaine d'artillerie Madelaine a démontré que le projet de M. Perkins n'était pas susceptible d'une application utile pour la guerre; que cet ingénieur ne parviendrait pas à lancer avec assez de force les projectiles de l'artillerie, même les plus faibles (les boulets de 4). M. Madelaine envisageant la question sous un autre point de vue, a proposé d'utiliser pour la défense *rapprochée* des places fortes, les machines à vapeur *ordinaires*, en les faisant servir comme moteurs de plusieurs volans d'un grand diamètre, doués d'une très-grande vitesse, qui leur serait communiquée à l'aide d'un simple engrenage. Ces volans seraient armés de palettes fortes et élastiques qui chasseraient un à un des projectiles dont le poids pourrait al-

ler jusqu'à 16 livres, jetés pêle-mêle dans une trémie faisant système avec l'arbre du volant qui pourrait pivoter. Ces machines seraient établies dans des casemates, etc., etc. (Voyez le *Journal des Sciences militaires*, janvier 1827.)

Machines mues par l'acide carbonique, etc.

289. On a proposé la vapeur de mercure, le gaz acide carbonique, comme moteurs. La vapeur de mercure présente trop d'inconvéniens pour que nous nous arrêtions à son emploi. Nous donnerons une idée de la machine de M. Brunel, ingénieur français, établi depuis long-temps à Londres. Cet habile mécanicien, qui a étonné différentes fois les Anglais par la hardiesse de ses conceptions, a conçu une machine dont l'acide carbonique, alternativement liquéfié et gazeïfié, serait le moteur.

Le gaz acide carbonique est réduit à l'état liquide par une pression de 36 atmosphères à la température de la glace. L'acide carbonique, liquide à cette température, a une force élastique de 36 atmosphères. Mais cette élasticité s'accroît peut-être du double par une élévation de température de 40 à 50 degrés. C'est sur ce développement considérable de force élastique, par un changement assez léger de température, qu'est fondée la nouvelle machine de M. Brunel.

La figure 166 en présente une coupe verticale. Le cylindre du milieu *A B*, renferme le piston *P*, qui doit être mis en mouvement.

Les deux cylindres *C* et *C'* sont tout-à-fait semblables; ils sont remplis d'huile jusqu'à moitié de leur hauteur; l'huile est recouverte d'un flotteur *F*.

Les deux cylindres *D* et *D'* reçoivent l'acide carbonique d'un grand gazomètre, à l'aide d'une pompe foulante. Quand l'acide est liquéfié dans chacun de ces cylindres, on ferme les ouvertures *O* et *O'*, par lesquelles il a été introduit.

La machine étant dans cet état, on fait arriver de l'eau chaude dans le tube *E* d'un des deux cylindres *C* et *C'* qui renferment l'acide, dans le cylindre *C*, par exemple, l'acide se gazeïfie, comprime le flotteur *F*, et fait monter le piston *P* à une hauteur déterminée; l'eau chaude arrive ensuite dans le tube *E'*, et l'eau froide dans le tube *E*, le piston descend. On voit que le piston est poussé par la différence des élasticités qu'a l'acide carbonique à la température ordinaire et à la température de 50 à 60 degrés.

Cette machine n'a pas encore été établie en grand; elle présente plusieurs inconvéniens; la haute pression de l'intérieur exige que toutes les parties soient faites avec un soin extrême pour empêcher les fuites et même les explosions. Les changemens continuels de températures des cylindres qui renferment l'acide carbonique, doivent les détériorer promptement. Le prix de l'acide carbonique, la consommation d'une quantité considérable d'eau chaude, doivent encore augmenter les frais. En sorte qu'il est probable que cette nouvelle machine ne présente pas d'avantages réels dans la pratique; mais elle offre une application ingénieuse des propriétés des gaz. C'est pour cette raison que nous avons cru devoir la faire connaître.

DE L'ÉLECTRICITÉ.

290. Cette belle branche de la physique doit aux découvertes modernes la plus grande partie de ses progrès. Pendant des siècles nos connaissances à ce sujet se sont bornées à ce que les anciens nous avaient appris sur la propriété que l'ambre acquérait par le frottement d'attirer les corps légers. Nous indiquerons d'une manière générale, à la fin de l'exposition des phénomènes électriques, les travaux les plus remarquables qui ont avancé cette partie de la physique.

Notions préliminaires.

291. 1°. Si l'on prend un tube de verre, ou un morceau d'ambre, ou un bâton de cire d'Espagne, et si on les frotte avec une étoffe de laine, ou une peau de chat, on remarquera que les petits corps légers qu'on en approchera seront attirés et précipités sur eux.

Cette nouvelle propriété, développée par le frottement, a été appelée *électricité*, parce qu'elle a été observée pour la première fois dans l'ambre, dont le nom grec est ἤλεκτρον.

Si l'on porte près de la joue un bâton de verre ainsi frotté, on éprouve une sensation pareille à celle que produirait une toile d'araignée.

Si l'on en approche le doigt, ou une boule de métal, on

entend le pétillement d'une étincelle lumineuse. Dans l'obscurité le tube est couvert lui-même d'une lumière bleuâtre.

On remarque encore que les corps ainsi frottés répandent une odeur de phosphore.

2°. Tous les corps sont-ils susceptibles d'acquérir les propriétés électriques par le frottement? cette propriété appartient à tous les corps simples, ou composés, solides, liquides ou gazeux. Par exemple, si l'on agite du mercure dans un vase de verre, on trouvera le verre électrisé. On fait encore la même expérience, en plaçant du mercure dans une capsule de bois fixée à l'extrémité supérieure d'un large tube de verre; si l'on fait ensuite le vide dans le tube, bientôt le mercure pressé par le poids de l'atmosphère tombera sous la forme d'une pluie dans l'intérieur du tube. Alors en approchant des corps légers du tube, on voit qu'il est électrisé.

On tire de là l'explication d'un phénomène que présentent les baromètres bien purgés d'air. Quand on penche ces baromètres de manière que le mercure remplisse rapidement tout le tube, on voit, si l'expérience est faite dans l'obscurité, se développer une lumière phosphorique tout-à-fait semblable à celle que produit l'électricité dans le vide.

Un corps solide peut aussi par le frottement d'un gaz, s'électriser d'une manière sensible. Ainsi, qu'on dirige, au moyen d'un soufflet, un courant d'air contre un carreau de verre, on le mettra dans l'état électrique. Il serait difficile de prouver directement que dans le frottement mutuel de deux gaz, il y a de l'électricité dégagée, mais on le conçoit bien par analogie; et même n'est-il pas

probable qu'une partie de l'électricité répandue dans l'atmosphère provient du frottement de l'air contre lui-même et contre les nuages.

3°. L'action électrique se propage à distance, et à travers toutes les substances. Ainsi une petite boule de moelle de sureau suspendue à un fil de soie, sous une cloche de verre, sera attirée par un bâton de cire d'Espagne placé hors de la cloche et préalablement électrisé.

4°. L'électricité se propage à travers les corps; mais les corps considérés sous le rapport de la propriété de conduire l'électricité diffèrent singulièrement entre eux; les uns, comme les métaux, l'eau, et en général tous les liquides (huiles exceptées), le charbon calciné, sont de bons conducteurs; les résines, les gommes, la cire d'Espagne, la soie, le soufre, les pierres, le verre, les oxides, l'air et les autres gaz analogues sont de mauvais conducteurs; la distinction entre les corps conducteurs et les corps non conducteurs a été établie par Grey et Wheeler en 1729. (*Histoire de l'électricité*, tom. I, 56.)

Pour constater la différence qui existe entre les corps conducteurs et les corps non conducteurs, prenez deux petites boules de moelle de sureau, entièrement semblables; suspendez l'une à un support de verre par un fil de verre, ou de soie; suspendez l'autre à un support de métal par le moyen d'un fil métallique; donnez à ces deux boules de l'électricité en les touchant avec un bâton de verre électrisé; vous remarquerez que la boule suspendue au fil métallique a perdu instantanément son électricité, tandis que celle qui est suspendue au fil de soie a bien conservé la sienne; or il n'y a de différence que dans la manière dont ils communiquent avec la terre; l'une des boules communique

avec la terre par un métal, son électricité trouve à travers ce métal un passage facile, se dissipe en totalité; l'autre, séparée du sol par une substance peu conductrice, n'éprouve aucune perte; remplacez le fil de soie par un fil de résine, de soufre, etc., vous obtiendrez le même résultat. Toutes ces substances sont donc impropres à transmettre l'électricité. Mouillez les fils avec de l'eau, à l'instant toute l'électricité disparaîtra, parce que l'eau est un bon conducteur.

Un corps est isolé quand il a pour support un corps non conducteur, un fil de soie, un bâton de cire d'Espagne, un tube de verre, etc. On appelle tabouret électrique une petite table dont les pieds sont en verre. Il est beaucoup de circonstances où l'on doit isoler les corps qu'on soumet aux expériences. Par exemple, veut-on savoir si les métaux deviennent électriques par le frottement, il faut les isoler par un manche de verre; si on les frotte ainsi isolés, avec une peau de chat ou avec une étoffe de laine, on verra qu'ils s'électrisent comme les corps non conducteurs; tandis que si on les tenait dans la main en même temps qu'on les frotte, l'électricité se dissiperait dans le sol.

L'air atmosphérique sec est un très-mauvais conducteur; mais s'il est chargé de beaucoup d'eau, il devient bon conducteur : aussi est-il tout-à-fait impossible de faire des expériences pendant les temps humides, parce que l'électricité se perd dans l'air et dans le sol à mesure qu'elle est produite, et l'on a reconnu que les expériences électriques ne réussissent jamais mieux que dans les temps froids et secs, où il y a très-peu de vapeur d'eau dans l'air.

5°. L'électricité ne change pas les dimensions des corps : en effet, qu'on plonge un thermomètre à mercure très-sensible dans un vase métallique rempli d'eau, et qu'on électrise fortement le liquide et le vase par le moyen de la machine électrique (*voyez* l'article de cette machine), le thermomètre sera tout-à-fait stationnaire. (L'abbé Nollet.)

6°. La vitesse de l'électricité paraît immense; on a reconnu que l'espace de quatre milles est parcouru dans un temps inappréciable.

7°. L'air est, comme nous l'avons déjà dit, un très-mauvais conducteur; il maintient par sa pression l'électricité à la surface des corps; ce qui le prouve, c'est que si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique, un corps conducteur électrisé et isolé sur des supports de résine ou de verre, ce corps peut même, avant que le vide soit complétement fait, perdre toute l'électricité dont il est chargé. Si l'on fait la même expérience avec un corps non conducteur, par exemple, avec un bâton de cire d'Espagne électrisé par le frottement, l'électricité se dissipe aussi dans le vide, mais avec plus de lenteur; et il faut un certain intervalle de temps sensible pour que le corps en soit tout-à-fait dépouillé.

Ce dernier résultat montre qu'à la surface des corps non conducteurs l'électricité est retenue par la pression de l'air, jointe à la difficulté qu'elle éprouve à se dégager de leurs particules.

8°. Nous avons parlé de la nécessité d'isoler les corps conducteurs, quand on les charge d'électricité; en effet, sans cette précaution, ils perdent toute leur électricité, qui se dissipe dans le globe où elle devient inappréciable;

c'est pour cela que, dans les expériences d'électricité, on appelle la terre le *réservoir commun* de l'électricité.

9°. Pour que le développement de l'électricité par le frottement soit facile, il faut préalablement sécher le corps qu'on veut soumettre aux expériences; on y parvient en le chauffant légèrement; il est aussi indispensable de chauffer le lieu où se font les expériences, afin que l'air devenant ainsi capable de prendre de nouvelle vapeur, n'en laisse pas déposer sur le corps qu'il enveloppe.

292. Reprenons les premières expériences, examinons plus attentivement les propriétés des corps électrisés. Pour cela attachons deux petites boules de sureau par deux fils métalliques à un bâton de résine (*fig.* 167), et frottons cette substance bien séchée avec une étoffe de laine également sèche; nous verrons les deux boules se repousser à certaine distance. Faisons l'expérience avec un bâton de résine et une seule boule; approchons cette dernière boule des deux premières, il y aura répulsion.

Répétons ces deux expériences en remplaçant le bâton de résine par un bâton de verre, nous verrons que les boules de moelle de sureau se repousseront de même.

Maintenant si nous approchons les boules électrisées par le verre de celles qui le sont par la résine, il y a attraction. En poursuivant les mêmes essais nous reconnaîtrions 1° que deux corps *chargés de la même espèce d'électricité se repoussent;* 2° *que deux corps chargés d'électricité de nature différente s'attirent.*

De plus il résulte des expériences que, parmi tous les corps, les uns donnent la même électricité que le verre: ce sont les oxides, les pierres, etc. On l'a appelée *électricité vitrée.* Les autres donnent la même électricité que la

résine; ce sont les corps inflammables, l'ambre, la soie, etc. Elle a reçu le nom d'*électricité résineuse* (1). Cette belle découverte a été faite en 1733 et 1734 par Dufay, membre de l'Académie des Sciences.

293. L'étoffe de laine, la peau de chat, et toutes les matières dont on se sert pour frotter un corps solide, se chargent d'électricité négative si ce corps acquiert l'électricité positive; ou réciproquement. Pour le prouver, on n'a qu'à présenter le morceau d'étoffe qui a servi à électriser la résine; elle attirera les petites boules de sureau chargées d'électricité négative, et repoussera les boules chargées d'électricité positive.

294. En recherchant la nature de l'électricité développée par le frottement d'un grand nombre de substances, on reconnaît que la nature de cette électricité n'a rien d'absolu, et qu'elle dépend autant de la nature du corps frottant que de celle du corps frotté. Par exemple, la soie frottée avec le verre poli, acquiert l'électricité positive; frottée avec la résine, elle acquiert l'électricité négative; un bâton de verre poli, frotté avec une étoffe de laine, s'électrise positivement, et frotté avec une peau de chat, s'électrise négativement.

Dans la table suivante, les substances acquièrent l'électricité positive lorsqu'on les frotte avec celles qui les suivent, et l'électricité négative quand on les frotte avec celles qui les précèdent.

---

(1) Comme le verre ne prend pas toujours l'électricité *vitrée*, et la résine l'électricité *résineuse*, et que d'un autre côté les deux électricités détruisent réciproquement leurs propriétés par leur réunion, on est généralement convenu de remplacer les expressions *vitrée* et *résineuse* par celles de *positive* et *négative*. En attachant à celles-ci le sens qu'on attache en géométrie aux ordonnées positives et négatives.

Peau de chat	Le papier
Le verre poli	La soie
L'étoffe de laine	La gomme-laque
Les plumes	Le verre dépoli
Les bois	

A l'occasion de la production de l'électricité nous citerons une expérience curieuse, qu'on répète souvent dans les cabinets de physique. Deux personnes montent sur des tabourets isolans, l'une des deux tient dans la main une peau de chat bien sèche, et en frappe l'autre personne; la première se charge d'électricité positive, l'autre d'électricité négative. Un petit pendule dans l'état naturel sera attiré par les deux personnes; toutes deux donneront des étincelles à l'approche des corps conducteurs qui communiquent avec le sol. Toutes deux seront lumineuses dans l'obscurité. Un pendule préalablement chargé d'électricité positive sera repoussé par la première, et attiré par la seconde.

On a fait beaucoup d'essais pour trouver les circonstances qui déterminent chacun des corps à prendre l'espèce particulière d'électricité qu'il acquiert; mais tous les essais n'ont rien appris de bien positif.

295. Le frottement n'est pas la seule manière de développer de l'électricité; mais c'est la plus commune et la plus anciennement connue : l'électricité se développe dans une infinité de circonstances.

Dans la fusion. Si l'on verse du soufre fondu dans un vase métallique isolé, le soufre prend en se refroidissant l'électricité positive et le métal l'électricité négative; ce phénomène n'est pas général, ainsi l'alliage fusible de Danet n'est pas électrisé après avoir été fondu dans un verre. (*Voyez* les additions.)

Dans la pression. L'expérience a appris qu'un grand

nombre de corps acquièrent par la pression les propriétés électriques. Tels sont en particulier le spath d'Islande, le caoutchouc (gomme élastique), l'écorce d'orange, le liége, etc. Nous indiquerons dans un chapitre séparé les principales particularités que ce phénomène présente.

Dans l'union chimique des corps. Ainsi, dissout-on de la limaille de fer dans l'acide sulfurique, il se développe une quantité considérable d'électricité, comme l'ont reconnu MM. Lavoisier et Laplace; la même chose serait observée dans la dissolution des autres métaux par les acides; il est très-bien constaté que la combinaison des alcalis et des acides est une source abondante d'électricité. L'alcali prend une électricité, l'acide acquiert l'électricité opposée.

Dans l'élévation de température. Un grand nombre de corps et peut-être tous, acquièrent la vertu électrique quand on élève leur température : l'un des points du corps prend l'électricité positive, le point opposé se charge d'électricité négative. Nous nous occuperons de ce sujet intéressant dans un article particulier.

Dans le contact. Deux substances quelconques étant en contact se mettent dans un état électrique opposé : ainsi placez une lame de cuivre sur une lame de zinc, vous verrez la première se charger d'électricité négative et la seconde d'électricité positive.

296. Quel que soit le mode employé, toujours on donne naissance aux deux électricités négative et positive. Il faut avouer cependant qu'il n'est pas toujours également facile de démontrer leur présence; c'est pourquoi nous attendrons que nous ayons des instrumens assez délicats pour étudier ces diverses circonstances avec fruit.

DES LOIS QUE SUIVENT LES ACTIONS ÉLECTRIQUES.

297. L'électricité exerce, comme nous l'avons vu, son action à des distances sensibles. Pendant long-temps on a admis que les actions électriques suivaient la loi des actions planétaires, c'est-à-dire qu'elles décroissaient comme le carré des distances.

C'est à Coulomb, physicien français, qu'appartient l'honneur d'avoir démontré d'une manière expérimentale la loi des actions électriques. Il a fait cette belle découverte au moyen de la balance de torsion, instrument ingénieux dont il a aussi enrichi les sciences.

L'instrument dont il s'agit est fondé sur cette propriété que possèdent les fils métalliques d'avoir une force de réaction proportionnelle à l'angle de torsion; la force de torsion est l'effort que fait un fil tordu pour revenir à sa première position.

La sensibilité de cet instrument est tellement grande qu'on peut le faire servir à mesurer avec précision des forces qui n'excèdent pas le poids d'un dix-millième de grain.

Construction de la balance.

298. Cet appareil est formé (*fig.* 168) d'un cylindre de verre de 12 pouces de diamètre et de 18 pouces de hauteur, couvert d'un plateau *A C* en verre de 3 pouces de diamètre; le plateau est percé de deux trous de 20 lignes

de diamètre, l'un au milieu en *f*, sur lequel s'élève un tuyau de verre de 24 pouces de hauteur; ce tuyau est cimenté sur le trou *f* avec le ciment en usage pour les appareils électriques; à l'extrémité supérieure du tuyau, en *h*, est placé un micromètre de torsion. Ce micromètre est composé d'un tuyau en cuivre, introduit à frottement dans le tuyau en verre; ce tuyau en cuivre porte une plaque *n m* percée d'un trou dans son milieu, pour recevoir une petite tige, à laquelle est attachée une aiguille *o n* qu'on fait tourner en même temps que la tige. La plaque est divisée sur son bord en 360 parties. La tige a à peu près la forme de l'extrémité d'un porte-crayon solide, qui peut se serrer au moyen d'un anneau. C'est dans la pince de ce porte-crayon qu'est saisie l'extrémité d'un fil d'argent très-fin; l'autre extrémité du fil d'argent est saisie en *p* par la pince d'un cylindre *p a* de cuivre ou de fer, dont le diamètre n'a guère qu'une ligne, et dont l'extrémité *p* est fendue, et forme une pince qui se serre par le moyen de l'anneau. Ce petit cylindre est percé et renflé en *C* pour y faire glisser l'aiguille *a g*. Il faut que le poids de ce cylindre soit assez considérable pour tendre le fil sans le rompre. L'aiguille *a g* est suspendue à la moitié à peu près de la hauteur du grand vase qui la renferme, et formée ou d'un fil de soie enduit de cire d'Espagne, ou d'une paille également enduite de cire d'Espagne, et terminée depuis *q* jusqu'en *a* par un fil cylindrique de gomme-laque : à l'extrémité *a* de cette aiguille est une petite balle de sureau de deux à trois lignes de diamètre; en *g* est un petit plan vertical de papier passé à la térébenthine, qui sert de contre-poids à la balle *a* et qui ralentit les oscillations (*fig.* 169).

Nous avons dit que le couvercle *A C* est percé d'un second trou *w*. C'est dans ce second trou qu'on introduit un petit cylindre *w t* dont la partie inférieure est de gomme-laque; en *t* est une balle également de sureau; autour du vase à la hauteur de l'aiguille l'on décrit un cercle *k z* divisé en 360 degrés. Le trou *w* correspond à peu près au zéro de cette division.

299. Quand on veut opérer avec cet instrument, on place l'aiguille *n m* du micromètre supérieur sur le zéro de sa division; on fait ensuite tourner tout le micromètre dans le tube vertical, jusqu'à ce que l'aiguille *a g* corresponde à la première division du cercle *k z*. On électrise un petit conducteur (*fig.* 170) qui n'est autre chose qu'une épingle à grosse tête, que l'on a isolée en enfonçant sa pointe dans l'extrémité d'un bâton de cire d'Espagne; on introduit cette épingle dans le trou *w*, et on lui fait toucher la boule *t* en contact avec la boule *a* : on retire l'épingle, et les deux boules étant chargées de la même espèce d'électricité, se repoussent mutuellement à une distance qu'on mesure. On tourne ensuite le micromètre supérieur de manière à tordre le fil de suspension, et l'on produit une force proportionnelle à l'angle de torsion, qui tend à rapprocher les boules. On observe, par ce moyen, les distances auxquelles différens angles de torsion ramènent la boule *a* vers la boule *t*; et par la comparaison des forces de torsion aux distances correspondantes des deux boules, on détermine la loi de la répulsion.

Nous ajouterons que Coulomb a démontré par l'expérience, que les forces nécessaires pour maintenir le fil tordu, sont proportionnelles au nombre de degrés de torsion.

Expérience.

300. Coulomb ayant électrisé les deux boules, la boule *a* a été repoussée à 36 degrés de la boule *t*, l'index du micromètre supérieur étant à zéro.

Ayant tordu le fil de suspension, en tournant le micromètre de 126 degrés, les deux boules se sont rapprochées et arrêtées à 18 degrés de distance.

Enfin ayant tourné le micromètre de 567 degrés, l'action du fil a été augmentée du même nombre de degrés, et les deux boules se sont rapprochées à 8 $\frac{1}{3}$ degrés.

Les expériences ne seraient pas comparables, si, pendant la durée de chacune qui a été de deux minutes, les boules eussent perdu de leur électricité. Mais ce jour-là, la perte a été très-faible, puisque les deux boules repoussées à la distance de 30 degrés, ne se sont rapprochées que d'un seul degré pendant deux minutes. Cela tenait à la sécheresse de l'air et à l'excellent choix des supports isolans.

Dans la première expérience, la force répulsive des deux boules fait équilibre à 36 degrés de torsion à la distance de 36 degrés. Par la disposition de l'appareil, il est visible que la torsion est nulle au commencement de l'expérience.

Dans le second essai, on tord le fil de suspension dans le sens opposé à la torsion 36° imprimée par l'action électrique; il faut donc ajouter les deux torsions. La torsion imprimée dans la partie supérieure est de 126 degrés; la force répulsive d'électricité retient les deux boules à 18 degrés, ainsi la force totale de torsion est $126° + 18° = 144°$.

tenir les deux boules à la moitié de la distance il faut donc une force quadruple.

D troisième épreuve, on tord le fil de suspension romètre supérieur de 567 degrés; les deux boules ent plus éloignées que de 8 ½. Ce qui porte la force totale de torsion à 575° ½. La distance est à peu près la moitié de celle périence, et la force qui fait équilibre aux de quadruple.

Ainsi il résulte de is, que l'action répulsive que les deux boules la même manière exercent l'une sur l'au ison inverse du carré de la distance.

Voici les trois resulta s dans un petit tableau, afin que la loi soit encore mieux en évidence.

Tableau.

Arc des distances.	Mesure de la force répulsive par la torsion.
36°	36°
18	144
8 ½	575 ½

Les expériences doivent être faites pendant les jours où l'air est le plus sec, afin d'atténuer la perte d'électricité occasionée par l'air et les supports; dans tous les cas, il convient de connaître cette perte pour établir la correction.

La distance des deux boules, lorsqu'elles sont éloignées l'une de l'autre par leur action répulsive réciproque, n'est pas précisément mesurée par l'angle qu'elles forment, mais par la corde de l'arc qui joint leurs centres. D'une

autre part, l'action répulsive de la boule fixe sur la boule mobile devient d'autant plus oblique que la distance est plus grande, mais la construction de la machine est tellement dirigée que les deux erreurs se compensent (*Mém. de l'Acad. des Sciences* 1785, p. 569).

Vérification de la loi.

301. On démontre en mécanique que lorsqu'une sphère solide ou creuse est composée de points doués d'un pouvoir attractif ou répulsif, et réciproque au carré de la distance, son action sur des points extérieurs est la même que si toute sa masse était réunie à son centre. Supposons que ce soit là le cas de nos boules, comme l'expérience paraît nous l'apprendre; nous pourrons dans le calcul les considérer comme de simples points; la force totale avec laquelle elles se repousseront sera réciproque au carré de la distance de leurs centres (1).

---

(1) Représentons par F, l'intensité de cette force à l'unité de distance des deux boules; elle deviendra $\frac{F}{D^2}$ à la distance D, et s'exercera suivant la corde $a\,b$ qui joint les deux boules (*fig.* 171).

Cette force $\frac{F}{D^2}$ agissant dans une direction oblique à $o\,b$ doit être décomposée en deux autres forces, l'une perpendiculaire à $o\,b$, et l'autre dans la direction $c\,b$. Cette dernière est détruite par la résistance du point o; on peut la négliger. La première, la seule qui fasse équilibre à la force de torsion, est égale $\frac{F}{D^2}$ cos. $a\,b\,t$ d'après la règle du parallélogramme des forces. Cet angle $a\,b\,t$ est complément $a\,b\,o$; ce dernier est égal à $90 - \frac{1}{2}\,a\,o\,b$, à cause du triangle $h\,c\,b$; $a\,b\,t$ est donc égal à $\frac{1}{2}\,a\,o\,b$; et

Le premier membre $\frac{F}{4r^2m}$ de l'équation (A) est formé entièrement de quantités numériques; le second doit être constant dans toutes les expériences, si la loi de la raison inverse du carré de la distance est conforme à la vérité; en effet, on voit par le tableau ci-joint que quel que soit l'angle où l'aiguille ait été chassée, cette expression conserve sensiblement la même valeur 5, 6.

---

si l'on désigne ce dernier par C, on aura $\frac{}{D^2}$ cos. $\frac{1}{2}$ C pour la force employée à repousser les deux boules.

On peut aussi exprimer la distance D en fonction de l'arc a. En effet si l'on mène du centre o la perpendiculaire $o\,h$ sur la corde $a\,b$; on la divisera en deux parties égales $a\,h$ et $h\,b$; et en désignant par r le rayon $o\,b$, on aura $D = 2\,r$ sin. $\frac{1}{2}\,C$; et en remplaçant D par cette valeur, l'expression de la force de torsion deviendra $\frac{F \cos. \frac{1}{2}\,C.}{4\,r^2 \sin.^2 \frac{1}{2}\,C.}$

Soit B le nombre total de degrés de torsion du fil dans le cas d'équilibre; la force de torsion est proportionnelle à cet arc, et peut être représentée par $m\,B$; m étant un coëfficient qui est particulier au fil employé, ou la force correspondante à un degré de torsion, il y a égalité entre ces deux forces, puisque nous supposons l'équilibre établi; on aura donc $\frac{F \cos. \frac{1}{2}\,C.}{4\,r^2 \sin.^2 \frac{1}{2}\,C.} = m\,B.$

D'où $\frac{F}{4\,r^2\,m} = B\,\frac{\sin.^2 \frac{1}{2}\,C}{\cos. \frac{1}{2}\,C}$ = ou bien en remplaçant $\frac{\sin. \frac{1}{2}\,C}{\cos. \frac{1}{2}\,C}$ par sa valeur tang. $\frac{1}{2}\,C$, on aura $\frac{F}{4\,r^2\,m} = B$ sin. $\frac{1}{2}\,C$ tang. $\frac{1}{2}\,C$. (A).

	C.	B.	B sin. $\frac{1}{2}$ C tang. $\frac{1}{2}$ C.
1re Expérience	36	36	3,614
2e Expérience	18	144	3,568
3e Expérience	8 $\frac{1}{2}$	575 $\frac{1}{2}$	3,169
La même en supposant	9	576	3,557

Les deux premiers résultats sont bien d'accord. L'écart du troisième répond à une erreur d'un demi-degré dans l'observation de l'arc. Cette erreur dépend en partie de la perte de l'électricité pendant l'expérience, et des nouveaux phénomènes qui se développent à une aussi petite distance. Nous pouvons faire abstraction de cet écart, et regarder comme bien établie la loi que nous avons trouvée par la balance de torsion.

Des expériences analogues à celles que nous venons de rapporter ont prouvé que les attractions électriques suivent la même loi que les répulsions.

302. Coulomb a encore démontré la loi des attractions électriques par une méthode que nous ferons connaître. Elle est moins directe que la précédente, mais elle a l'avantage d'être plus facile.

Cette méthode consiste à suspendre une aiguille dont l'extrémité seule est électrisée, et qui, placée à une certaine distance d'un globe chargé d'une électricité de nature différente, est attirée et oscille en vertu de l'action de ce globe. L'on détermine ensuite par le calcul, d'après le nombre d'oscillations faites dans un temps donné, la force attractive à différentes distances, comme l'on détermine la force de la gravité par les oscillations du pendule ordinaire (*Académie des Sciences*, 1785, p. 581).

L'aiguille est un fil de gomme-laque, de 15 lignes de longueur, suspendu à un fil de soie de 7 à 8 pouces, tel

qu'il sort du cocon. A une extrémité de l'aiguille on fixe perpendiculairement à sa direction un petit cercle de papier doré, de 7 à 8 lignes de diamètre. L'extrémité supérieure du fil de soie est attachée à un bâton de cire d'Espagne. La flexibilité de cette suspension est extrêmement grande. Il suffirait d'un poids d'un cent vingt-millième de grain appliqué à l'extrémité de l'aiguille horizontale pour la faire marcher d'un cercle entier. On abandonne d'abord ce fil à lui-même dans un lieu bien calme, afin de détruire tout-à-fait la torsion qu'on aurait pu lui donner par hasard.

Le globe est en cuivre ou en carton couvert d'étain, et porté sur quatre tubes de verre, surmontés chacun d'un petit cylindre de cire d'Espagne. Il est placé de manière qu'on puisse le faire monter et descendre jusqu'à ce que son centre soit bien en face de l'extrémité de l'aiguille. On peut aussi l'approcher ou l'éloigner de l'aiguille.

Le tout étant ainsi disposé, on donne au globe une certaine quantité d'électricité au moyen d'une bouteille de Leyde ou de toute autre manière; on donne en même temps à l'aiguille une électricité contraire, de sorte que le globe et l'aiguille agissent l'un sur l'autre par attraction.

Expériences.

Distance du centre du globe au centre du cercle doré.	Durée de quinze oscillations.
9	20″
18	40
24	60

Comme le petit cercle doré n'a que 7 lignes de diamè-

tre, et qu'il ne s'éloigne et ne s'approche du globe pendant une même expérience que d'une quantité insensible, la force attractive du globe sur le cercle doré est constante; et si à l'unité de distance on la désigne par F, elle deviendra $\frac{F}{D^2}$ à la distance D. Ici on peut considérer comme des points le globe à cause de sa sphéricité, et le cercle à cause de sa petitesse.

De plus, comme les étendues des oscillations sont fort petites, et que l'aiguille est éloignée d'une quantité fort considérable comparativement à sa longueur, il s'ensuit que les lignes menées du cercle de papier au centre du globe sont parallèles. Les formules du pendule (n° 25) sont donc applicables ici.

Si donc on nomme l la longueur du pendule, T la durée d'une oscillation, g l'intensité de la force de la pesanteur, on a

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

π étant, comme nous l'avons déjà vu, le rapport de la circonférence au diamètre. Dans notre expérience g doit être remplacé par $\frac{F}{D^2}$; ce qui conduit à

$$T = D\pi \sqrt{\frac{l}{F}}.$$

Cette formule indique qu'avec une même aiguille et une même force attractive F, les temps des oscillations sont proportionnels aux distances D. C'est aussi à peu près ce qui résulte des observations; car on a vu que le [illegible] doré, à 9 pouces du centre du globe, a fait 15 os[illegible] en 20".

à 18 pouces, a fait 15 oscillations en 40″.

à 24 pouces, a fait 15 oscillations en 60″.

Les deux premières sont bien d'accord; la troisième aurait dû donner 54″.

Il faut remarquer que la durée des trois essais a été de quatre minutes; que le jour de l'expérience l'électricité perdait $\frac{1}{40}$ par minute. En faisant la correction, on trouve que la durée aurait dû être de 57″ s'il n'y avait pas eu de perte, au lieu de 54 que donne la proportionnalité rigoureuse. Ce qui réduit l'erreur à $\frac{1}{20}$ du résultat total. On peut considérer ces expériences comme une confirmation de la loi que la balance de torsion nous avait déjà fait connaître (*Acad. des Sciences*, 1785, p. 581).

Il serait facile de répéter la même expérience avec des électricités de même nature.

303. Il nous reste à découvrir dans quelle proportion chaque corps contribue à l'effet total dans la réaction mutuelle de deux corps électrisés.

Pour cela il suffira d'enlever à l'un quelconque des corps la moitié de son électricité. On y parvient en le touchant avec un corps entièrement semblable.

Supposons, par exemple, que, dans la balance de torsion, la boule fixe et la boule mobile étant électrisées et à la distance 28°, la répulsion soit capable de faire équilibre à 120° + 28° ou 148° de torsion.

Dans cet état on touche la boule fixe avec une autre boule de même volume et de même nature. On détord le fil de suspension, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli à 28°; le micromètre supérieur ne répond plus qu'à 44°; le

fil de suspension n'est donc plus tordu que de $44^\circ + 28^\circ$, ou 72°.

En ajoutant à 72 la perte de $\frac{1}{30}$ pour une minute, durée de l'expérience, on a $72 + \frac{72}{30}$ ou $73\frac{1}{2}$. Cette valeur corrigée approche tant de 74, moitié de 148, que l'erreur peut être négligée.

La même expérience, répétée plusieurs fois avec des boules, des cercles, etc., donne le même résultat. Il suit de là que l'attraction et la répulsion de deux corps électrisés à la distance D, est exprimée par $\frac{EE'}{D^2}$; E, E' étant des constantes proportionnelles aux quantités d'électricité de chaque corps.

Une remarque importante, c'est que l'égalité du partage est indépendante de la nature des boules: ainsi la boule fixe de moelle de sureau a perdu la moitié de son électricité aussi-bien par le contact d'une boule de cuivre que par celui d'une boule de moelle de sureau. Il résulte de ce que le partage de l'électricité entre des corps conducteurs de même forme et de même volume se fait toujours en proportions égales, quelle que soit la nature de leur substance, que ces corps n'ont pas d'affinité chimique pour l'électricité.

De la Perte de l'électricité par l'air et par les supports qui la retiennent imparfaitement. Lois suivant lesquelles cette Perte s'effectue.

304. Lorsqu'un corps conducteur électrisé est isolé par des soutiens mauvais conducteurs, l'expérience apprend que l'électricité de ce corps décroît et s'anéantit assez rapidement. L'objet de ce chapitre est de déterminer suivant quelles lois se fait ce décroissement : la connaissance de ces lois est nécessaire pour pouvoir soumettre au calcul les autres phénomènes électriques dont il nous reste à faire l'étude, parce que les expériences destinées à approfondir ces phénomènes, ne pouvant s'exécuter dans un même instant, ne doivent être comparées entre elles qu'autant qu'on connaît l'altération qu'elles éprouvent pendant leur durée.

305. Deux causes paraissent principalement concourir à faire perdre l'électricité par les supports. 1° Il est probable qu'il n'y a dans la nature aucune substance parfaitement isolante; on ne connaît pas en effet de substance qui ne propage une électricité énergique. Pour s'en convaincre, on n'a qu'à former des cylindres avec les substances les moins conductrices, le verre, la cire d'Espagne, la gomme-laque, on reconnaîtra que, si on les met en contact avec le premier conducteur d'une machine électrique, il se chargeront de quantités d'électricité sensibles aux électroscopes; et même on pourra s'assurer que l'é-

lectricité s'est propagée sur le cylindre avec une intensité décroissante.

Tous les supports qu'on emploie pour isoler les corps électrisés doivent donc se charger d'électricité; et, s'ils sont assez courts pour en être chargés dans toute leur longueur, ils produisent un écoulement continuel d'électricité. Cet écoulement sera encore favorisé par la vapeur d'eau contenue dans l'air, qui se précipitant sur les supports, augmentera leur faculté conductrice; il est même impossible de faire des expériences d'électricité si l'on n'a préalablement le soin de sécher les supports isolans des appareils.

2°. Les supports isolans sont toujours enveloppés de toutes parts par l'air atmosphérique. Les particules de vapeur qu'il renferme, étant en contact avec le corps électrisé, se chargent d'électricité, sont repoussées et remplacées par d'autres, et ainsi de suite. Il doit donc s'établir à la surface du corps électrisé des courans d'air qui finissent par lui enlever toute son électricité. On peut aussi concevoir que l'électricité se propage par les molécules de l'air.

Les recherches actuelles doivent donc avoir deux objets; le premier de déterminer suivant quelle loi l'électricité se perd par le contact de l'air; le deuxième de déterminer suivant quelle loi la même électricité se perd le long des supports isolans.

Perte par l'air.

306. Coulomb est parvenu à isoler la perte de l'air. Après beaucoup d'essais, il a reconnu que lorsque l'énergie électrique n'est pas très-considérable, un petit cylin-

dre de cire d'Espagne ou de gomme-laque, d'une demi-ligne de diamètre et de 18 à 20 lignes de longueur, suffit presque toujours pour isoler parfaitement une balle de sureau de 5 à 6 lignes de diamètre. Il a également reconnu que, pour un air sec, un fil de soie très-fin, passé dans de la cire d'Espagne bouillante, et ne formant ensuite qu'un petit cylindre d'un quart de ligne, remplit aussi le même objet, pourvu qu'on donne à ce fil une longueur de 5 à 6 pouces. Un fil de verre tiré à la lampe d'émailleur, de 5 à 6 pouces de longueur, n'isole la boule que dans les jours très-secs, et lorsqu'elle est chargée d'une très-faible quantité d'électricité. Il en est de même d'un cheveu ou d'une soie, à moins qu'ils ne soient enduits de cire d'Espagne, ou, ce qui vaut encore mieux, de gomme-laque. On reconnaît que les supports isolent parfaitement, lorsque leur multiplication n'augmente pas la perte d'électricité. (*Académie des Sciences*, 1785, p. 616.)

307. Guidé par ces observations préliminaires, Coulomb suspendit une petite boule de moelle de sureau à un fil de soie très-fin enduit de cire d'Espagne, terminé par un petit cylindre de gomme-laque de 18 à 20 lignes, de sorte que l'isolement de cette petite boule pouvait être considéré comme parfait. L'isolement de la boule mobile l'était également, puisque nous avons vu, n° 293, qu'elle était portée par une aiguille de gomme-laque. Le diamètre des deux boules était le même; la flexibilité du fil était tellement grande, qu'en agissant avec un levier de 4 pouces, il suffisait d'un poids de $\frac{1}{140}$ de grain pour le tordre de 360 degrés.

Voyons l'expérience : Coulomb électrise les deux boules, au moyen d'une épingle à grosse tête; elles se repo-

sent jusqu'à 40 degrés de distance; il augmente la torsion de manière à les ramener à 20 degrés; supposons qu'il faille pour cela tordre le fil de 140 degrés; on note le moment où, sous ce degré de torsion, les deux boules se tiennent à la distance de 20 degrés; comme l'électricité se perd, les deux boules se rapprochent quelques minutes après l'opération; ainsi pour pouvoir les observer toujours à la première distance de 20, on détord le fil de suspension de 30 degrés, au moyen de l'index supérieur, elles se repoussent à une distance un peu supérieure à 20 degrés. On attend qu'elles soient à cette dernière distance; on tient compte du temps écoulé, que nous supposerons de trois minutes.

L'intensité au commencement de l'expérience était de 140 + 20 ou 160;

Au bout de trois minutes, 110 + 20 ou 130.

Elle était donc diminuée de 30 degrés pendant trois minutes, ou de 10 degrés pour une minute.

L'intensité moyenne était de 145; il en résulte que la perte par minute était de $\frac{10}{145}$, ou $\frac{1}{14,5}$.

C'est par des opérations semblables que Coulomb a formé le tableau ci-joint.

La forme de ce tableau dispense de donner des explications particulières sur chacune des colonnes.

On rapporte les dates, les degrés du thermomètre et de l'hygromètre, la hauteur du baromètre, comme Coulomb l'a fait dans son *Mémoire*.

ÉPOQUES DES EXPÉRIENCES.					DISTANCE DES BALLES.	TORSIO DU MICROMÈT
		matin.				
Ier EXPÉRIENCE,	1er Essai,	6 h.	32′	30″	..30°..	.120°
le 28 mai :	2e Essai,	6	38	15	..*idem*.	.100
Hygromètre, 75 deg.	3e Essai,	6	44	30	...*id*...	..80
Thermom., 15 deg. ½;	4e Essai,	6	53	0	...*id*...	..60
Baromètre, 28 p. 3 l.	5e Essai,	7	3	0	...*id*...	..40
	6e Essai,	7	17	0	...*id*...	.. 20
		matin.				
IIe EXPÉRIENCE,	1er Essai,	5 h.	45′	30″	..30°..	.130°
le 29 mai :	2e Essai,	5	53	0	...*id*...	.110
Hygromètre, 69 deg.	3e Essai,	6	2	30	...*id*...	..90
Thermom., 15 deg. ½;	4e Essai,	6	12	15	...*id*...	..70
Baromètre, 28 p. 4 l.	5e Essai,	6	33	0	...*id*...	..40
	6e Essai,	6	51	0	...*id*...	.. 20
		matin.				
IIIe EXPÉRIENCE,	1er Essai,	11 h.	53′	45″	..20°..	.. 80°
le 22 juin :	2e Essai,	11	56	45	...*id*...	..60
Hygromètre, 87 deg.	3e Essai,	11	59	45	...*id*...	..40
Thermom., 15 deg. ½;	4e Essai,	12	5	0	...*id*...	.. 20
Baromètre, 27 p. 11 l.	5e Essai,	12	12	15	...*id*...	... 5
		matin.				
IVe EXPÉRIENCE,	1er Essai,	7 h.	43′	40″	..20°..	.. 80°
le 2 juillet :	2e Essai,	7	49	0	...*id*...	..60
Hygromètre, 80 deg.	3e Essai,	7	[illegible]	[illegible]	...*id*...	..40
Thermom., 15 deg. ½;	4e	[illegible]	9		...*id*...	[illegible]
Baromètre, 28 p. 2 l.					[illegible]	[illegible]

TEMPS ÉCOULÉ entre deux OBSERVATIONS consécutives.	FORCE ÉLECTRIQUE perdue entre deux observations.	FORCE MOYENNE entre deux observations.	RAPPORT DE LA FORCE ÉLECTRIQUE perdue par le corps pendant une minute à la force moyenne du corps.
5′ ½	20°	140°	$\frac{1}{40}$
6′ ½	20	120	$\frac{1}{48}$
8′ ½	20	100	$\frac{1}{40}$
10′	20	80	$\frac{1}{40}$
14′	20	60	$\frac{1}{42}$
7′ ½	20°	150°	$\frac{1}{16}$
9′ ½	20	130	$\frac{1}{21}$
9′ ½	20	110	$\frac{1}{14}$
20′ ½	30	75	$\frac{1}{18}$
18′	20	60	$\frac{1}{18}$
3′	20°	90°	$\frac{1}{13,5}$
3′	20	70	$\frac{1}{17}$
5′ ½	20	50	$\frac{1}{15,5}$
11′ ½	25	28	$\frac{1}{15,5}$
5′ ½	20°	90°	$\frac{1}{18}$
8′ ½	20	70	$\frac{1}{17}$
[illegible]	20	50	$\frac{1}{10}$
[illegible]	[illegible]	35	$\frac{1}{12}$

On voit, d'après ce tableau, que le rapport de la force électrique perdue à la force totale, a été représenté le même jour, ou dans un même état de l'air, par une quantité constante; que ce rapport n'a varié qu'à mesure que l'hygromètre a annoncé une variation dans l'humidité de l'air; d'où il résulte que, pour un même état de l'air, la perte de l'électricité est toujours proportionnelle à l'intensité électrique.

308. Coulomb a encore trouvé, par une suite nombreuse d'expériences, que, quels que fussent le volume des balles et l'intensité électrique de chacune d'elles, le rapport de la force perdue dans une minute à la force totale était une quantité constante. Ainsi, dans l'expérience du 28 mai, qu'on présentât à la boule de l'aiguille une boule double en grosseur, et qu'on donnât à la seconde une intensité électrique plus grande ou plus petite qu'à la première, la perte de la force électrique par minute était toujours $\frac{1}{41}$ de la force totale. Ce qu'il y a de bien remarquable, c'est que, quelle que soit la figure qu'ait un corps électrisé, le décroissement de l'intensité électrique a, dans tous les cas, pour mesure une quantité à peu près constante, lorsque l'air est sec et que le degré d'électricité n'est pas très-considérable. Coulomb a fait cette épreuve avec un globe d'un pied de diamètre, avec des cylindres de toutes les grosseurs et de toutes les longueurs; il a substitué aux boules de sa balance des cercles de papier ou de métal; il a même armé un jour l'une d'entre elles d'un petit fil de cuivre de 10 lignes de longueur et d'un quart de ligne de diamètre; il a trouvé que le jour où il faisait ces expériences, le décroissement de l'intensité électrique de tous les corps, si différens par leurs formes,

était d'un centième par minute. Mais il faut toutefois remarquer que cette égalité de décroissement n'a lieu pour les corps de formes si différentes, que lorsque l'électricité est peu énergique.

309. Une autre remarque non moins curieuse, c'est que la nature de la matière du corps n'influe nullement sur la loi du décroissement de l'électricité; ainsi, le 28 mai où par le tableau on voit que l'électricité décroissait de $\frac{1}{42}$ par minute, pour des balles de sureau, elle décroissait de la même quantité pour une boule de cuivre, et même pour une boule de cire d'Espagne, substance bien peu conductrice.

310. D'après le tableau, on voit que la perte par l'air est d'autant plus grande, que le degré de l'hygromètre est plus rapproché de l'extrême humidité.

	Hygromètre.	Quantité qu'un pied cube d'air tient en dissolution.	Électricité perdue à chaque minute.
29 mai	69	$\frac{46}{100}$	$\frac{1}{46}$
26	75	$\frac{48}{100}$	$\frac{1}{41}$
2 juillet	80	$\frac{61}{100}$	$\frac{1}{29}$
22 juin	87	$\frac{71}{100}$	$\frac{1}{14}$

Coulomb avait calculé la quantité d'humidité d'après les tables de Saussure; nous avons préféré à ces dernières la table de M. Gay-Lussac, qui, quoiqu'elle n'ait pas été faite à la température de 15 degrés, qui est celle des expériences de Coulomb, donne pour cette dernière température des résultats plus exacts que ceux que fournit la table de Saussure, qui a été construite d'après des expériences faites à un grand nombre de températures.

Perte par les supports.

311. La loi de la déperdition de l'électricité, par le seul contact de l'air, est connue d'après ce qui précède; il reste à rechercher la perte opérée par les supports qui produisent un isolement imparfait.

Dans les expériences précédentes, on a employé des supports qui étaient des isolans parfaits pour les degrés d'électricité qu'on voulait observer. On s'est assuré que les supports remplissaient cette condition, lorsqu'en les multipliant on n'a pas augmenté la perte.

La première idée qui s'offre à l'esprit, est de faire choix de supports qui isolent assez imparfaitement, pour que la perte qu'ils produisent soit très-grande, comparativement à celle que produit l'air seul; mais une déperdition très-rapide aurait un inconvénient grave. En effet, quand on électrise les deux boules, l'aiguille oscille pendant quelque temps; elle oscille encore quand on touche au micromètre pour diminuer la torsion du fil; de sorte que si la déperdition était très-rapide, toute l'électricité serait anéantie avant que l'aiguille fût à l'état de repos. Il faut donc employer des isolans assez parfaits, pour que l'intensité de l'électricité n'éprouve pas de variation considérable pendant les expériences.

Aussi Coulomb a suspendu la boule fixe, non plus par un petit cylindre de gomme-laque, qui isole parfaitement, mais par un simple fil de soie d'un seul brin, tel qu'il sort du cocon. Ce fil avait quinze pouces de longueur; le diamètre de la boule mobile était toujours égal à celui de la boule fixe; elle était parfaitement isolée.

perte se mesure comme dans les cas précédens. Le tableau suivant renferme les expériences; elles ont été faites le même jour que celles que nous avons rapportées dans le tableau sur la perte due au contact de l'air; conséquemment on peut emprunter de celles-ci la loi du décroissement qui aurait eu lieu sans l'imperfection des supports.

ÉPOQUES DES EXPÉRIENCES.		DISTANCE DES BALLES.	TORSIO DU MICROMÈT
	matin.		
Ier EXPÉRIENCE, le 28 mai.	1er Essai, 10 h. 0′ 0″	..30°..	+150°
	2e Essai, 10 2 30	..idem.	..120
	3e Essai, 10 8 0	...id...	...80
	4e Essai, 10 13 0	...id...	...60
	5e Essai, 10 29 30	...id...	...20
	6e Essai, 10 50 30	...id...	0
	7e Essai, 11 7 0	...id...	
	matin.		
IIe EXPÉRIENCE, le 29 mai.	1er Essai, 7 h. 34′ 0″	..30°..	..150°
	2e Essai, 7 36 40	..idem.	..130
	3e Essai, 7 41 30	...id...	..110
	4e Essai, 7 48 20	...id...	...90
	5e Essai, 7 55 45	...id...	...70
	6e Essai, 8 27 30	...id...	...50
	7e Essai, 8 25 0	...id...	...30
	8e Essai, 8 42 30	...id...	...15
	9e Essai, 9 5 0	...id...	1

TEMPS ÉCOULÉ entre deux OBSERVATIONS consécutives.	FORCE ELECTRIQUE perdue entre deux observations.	FORCE MOYENNE entre deux observations.	RAPPORT DE LA FORCE ÉLECTRIQUE perdue pendant une minute à celle qui reste au corps.
2′ ½	30°	165°	$\frac{1}{14}$
5′ ½	40	130	$\frac{1}{18}$
5′	20	100	$\frac{1}{41}$
16′ ½	40	70	$\frac{1}{29}$
21′	20	40	$\frac{1}{41}$
16′ ½	10	25	? $\frac{1}{41}$
2′ 40″	20°	170°	$\frac{1}{18}$
4′ 50″	20	150	$\frac{1}{17}$
6′ 50″	20	130	$\frac{1}{44}$
7′ 25″	20	110	$\frac{1}{41}$
11′ 45″	20	90	$\frac{1}{18}$
17′ 30″	20	70	$\frac{1}{41}$
17′ 30″	15	52	$\frac{1}{18}$
22′ 30″	14	38	?

ière remarque que nous offre ce tableau, c'est le décroissement de l'électricité, d'abord beaucoup pide que par le contact de l'air seul, lorsque l'in- lu degré de force répulsive des boules est considé- , se ralentit graduellement, à mesure que cette intensité s'affaiblit; de sorte qu'il vient un moment où la boule suspendue par le fil de perd pas plus que lorsqu'elle est isolée comp par un fil de gomme-laque. Il résulte de là limite le fil de soie de quinze pouces est i it, et qu'il conserve cette propriété pour toi l'électricité plus faibles. Pour un degré de e capable de faire équilibre à 40 degrés de torsion, la perte était de $\frac{1}{42}$ par minute, la même qui avait *été trouvée le même jour par* l'air seul (première table). Le lendemain la perte par l'air était réduite à $\frac{1}{60}$; alors le fil de soie a commencé à être un isolant parfait, lorsque la force répulsive a été de 70 degrés. Ainsi, plus la perte par l'air seul est considérable, plus la perte par les supports l'est aussi. Coulomb a cherché le rapport entre les intensités électriques que des supports d'une même substance peuvent isoler complétement; et il est résulté de ces recherches que l'intensité électrique où un fil de soie, un cheveu, et tout corps cylindrique très-fin de substances analogues, commence à isoler, était, pour le même état de l'air, *proportionnelle à la racine carrée de la longueur;* en sorte que, par exemple, si un fil de soie d'un pied de longueur commence à isoler un corps dont l'intensité électrique est A, un fil de quatre pieds pourra isoler ce corps chargé d'une intensité électrique $2A$.

Des machines électriques.

312. Pour agrandir les effets électriques, il faut opérer le frottement sur de grandes surfaces; c'est à cet usage que sont destinées les machines électriques. Dans la machine électrique employée aujourd'hui, l'électricité est produite par le frottement qu'exercent plusieurs coussins remplis de crin, sur les deux surfaces d'un plateau en verre; ce plateau, dans une position verticale, est fixé à un axe auquel une manivelle imprime un mouvement de rotation (*fig.* 172). On applique sur les coussins, préalablement recouverts d'une matière grasse, de l'or mussif (deuto-sulfure d'étain), ou bien un amalgame d'étain et de mercure, ou même un alliage triple de 1 partie d'étain, de 2 p. de zinc, et de 4 p. de mercure. Ce sont là les substances que l'expérience a indiquées comme les plus propres au développement de l'électricité.

L'électricité, à mesure qu'elle est développée, est attirée par des pointes métalliques, situées horizontalement à une petite distance du plateau de verre; ces pointes font partie d'un cylindre en cuivre auquel on donne le nom de conducteur; ce conducteur a ordinairement la forme d'un fer à cheval. Il faut qu'il ait autant de branches qu'il y a de coussins, afin que le plateau, quand il arrive sur un frottoir, soit complétement déchargé. Il convient encore que les pointes soient placées de manière à décharger le plateau de chaque côté. *Voyez* figure 172.

Tout est disposé de manière à rendre le frottement étendu et durable. En effet les coussins s'appliquent exactement sur la surface du verre, par le moyen d'un ressort qui tend à rapprocher les deux montans en bois aux-

quels ils sont attachés. Dans cette machine les coussins se chargent d'électricité négative, et le plateau d'électricité positive. Mais il est absolument nécessaire de faire communiquer les coussins avec le sol, par le moyen d'une chaîne métallique; sans cette précaution, les effets produits par la machine seraient faibles. Si le frottoir restait chargé d'électricité négative, il ne se développerait plus de nouvelle électricité, passé un certain terme. Car, supposons que l'électricité négative du frottoir soit capable de vaincre la résistance de l'air, il serait arrivé au maximum de saturation; en conséquence le plateau en verre ne se chargerait plus d'électricité positive que de la quantité correspondante à la quantité d'électricité négative, qui pourrait se dégager dans l'air; et si l'isolement des coussins était parfait, le plateau ne se chargerait plus de nouvelle portion d'électricité.

313. L'accumulation de l'électricité sur les conducteurs ne cesse que lorsque la force répulsive est capable de vaincre la résistance de l'air. Afin d'accroître autant que possible cette force répulsive, on cherche à rendre bien unie la surface du conducteur, et à éviter surtout les pointes.

314. On agrandit la surface des conducteurs, en y ajoutant des cylindres en fer blanc, suspendus par des cordons de soie, ou supportés par des tubes de verre. On joint ces conducteurs, qu'on a appelés *secondaires*, au conducteur principal, par le moyen d'une chaîne ou d'une tige métallique. Cette disposition a l'avantage de permettre, lorsqu'on cesse de faire tourner le plateau, de supprimer la communication établie entre le conducteur principal et les conducteurs secondaires; on prévient ainsi l'écoulement de l'électricité accumulée, qui s'échapperait rapi —

dement par les pointes, quand l'électricité du plateau ne la refoulerait plus par sa répulsion.

Le conducteur de la machine électrique est nécessairement isolé; on le fait reposer sur des bâtons de verre enduits de cire d'Espagne, ou, mieux encore, de gomme-laque.

315. On place ordinairement sur le conducteur l'électromètre à cadran de Lane. On juge par le nombre de divisions parcourues par l'aiguille, de l'énergie de la charge des conducteurs. On reconnaît, en faisant l'expérience, qu'il suffit, dans un temps sec, de quelques tours pour porter la charge au maximum.

Afin que les parties du plateau en verre, qui sont successivement frottées, arrivent devant le conducteur, sans avoir perdu par le contact de l'air que le moins possible de l'électricité qu'elles ont acquise, on fixe au frottoir des morceaux de taffetas gommé, qui s'étendent sur la surface du verre dans le sens du mouvement.

316. La machine que nous venons de décrire produit sur ses conducteurs de l'électricité positive; si l'on désirait de l'électricité négative, il faudrait faire communiquer le plateau avec le sol, et les coussins avec les conducteurs. Dans la machine de la faculté des sciences, que M. Fortin a construite d'après le modèle de celle de M. Van Marum de Harlem, le conducteur est mobile, de manière qu'on le peut mettre à volonté en communication avec le plateau et les coussins. Veut-on l'électricité positive? le conducteur *A B* est horizontal, les coussins *C D* sont en communication avec le réservoir commun; veut-on l'électricité négative? on détruit cette dernière communication; on tourne le conducteur, on le rend vertical (*fig.* 173). Les coussins sont garnis de plaques métalliques, afin de

rendre la communication plus complète. Il est visible que dans cette machine il faut que les supports soient faits avec des substances bien isolantes. Il faut aussi que dans ce dernier cas les branches métalliques, armées de pointes, et en communication avec le sol, remettent continuellement le plateau en verre dans l'état naturel.

317. Les perfectionnemens qu'on a apportés dans la construction des machines électriques ont suivi la marche de la science; tant qu'on n'a connu que les attractions et les répulsions électriques, le besoin des machines telles que nous les possédons aujourd'hui ne s'est pas fait sentir; un morceau d'ambre, de cire d'Espagne, suffisait pour constater quelques faits connus.

Otto de Guericke et Hauksbée, pour développer plus d'électricité, imaginèrent de frotter des globes de soufre et de verre, en leur imprimant un mouvement de rotation. La découverte de la bouteille de Leyde a fait naître le besoin de nouvelles machines. On a augmenté les dimensions de celles qu'on possédait. Mais dans toutes les machines de l'abbé Nollet, de Wilson, de Nairne, le corps frotté était toujours un globe ou un cylindre.

Ramsden a contribué au perfectionnement des machines électriques, en remplaçant les globes et les cylindres par un plan de verre circulaire tenu dans une position verticale; ce plan tourne contre quatre coussins : c'est la machine en usage aujourd'hui.

La machine attribuée à Nairne est représentée dans la figure 174. C'est un cylindre creux de verre qu'on frotte contre deux coussins *A* et *B*, fixés à un conducteur; l'électricité est enlevée par les pointes d'un conducteur *C D*, de sorte qu'on peut avoir à volonté l'une ou l'autre espèce d'électricit

Disposition de l'Électricité à la surface des corps conducteurs isolés.

318. De ce que l'expérience nous a appris que la seule conformité de la surface de deux corps qui sont en contact, suffit pour établir entre eux un partage égal d'électricité; et de ce que la même égalité s'observe entre un corps plein et un corps creux, ne doit-on pas conclure que l'électricité se porte à la surface des corps? Ceci n'est qu'un soupçon. Des expériences directes vont prouver qu'il est conforme à la vérité. Qu'on prenne une sphère creuse de métal, à laquelle on ait pratiqué une ouverture de 2 à 3 centimètres de diamètre; qu'on la place sur un support isolant, et qu'on lui communique, par la machine électrique, une certaine quantité d'électricité; et même, si l'on veut, qu'on établisse la communication entre l'intérieur et le corps électrisé. Si on éloigne maintenant la sphère du conducteur, pour porter dans l'intérieur une boule de métal, fixée à l'extrémité d'un long fil de gommelaque; en la retirant, et en la présentant à un petit pendule, on verra qu'elle n'est pas chargée de la plus faible quantité d'électricité. Si au contraire on touche la surface extérieure avec la même boule, elle prendra assez d'électricité pour faire mouvoir le pendule; et, si l'on a chargé d'avance ce pendule d'une certaine quantité d'électricité, on reconnaîtra que la sphère avait la même électricité que le conducteur.

Quand on répète cette expérience, il faut avoir l'attention d'introduire dans la sphère, et d'en retirer le plus promptement possible la boule métallique, en la faisant passer par le milieu de l'ouverture, pour l'empêcher d'enlever quelque portion d'électricité accumulée sur ses bords. On trouve quelquefois que la boule présente de faibles signes d'une électricité de nature *contraire* à celle de la sphère, et qui ne disparaît même pas par le contact des corps conducteurs. Cette permanence annonce que cette électricité n'appartient pas en propre à la boule, mais qu'elle lui est communiquée par la gomme-laque, qui la lui rend à mesure qu'on l'enlève. Nous verrons plus loin comment la gomme-laque peut prendre à distance une électricité contraire à celle de la sphère.

L'expérience peut encore être répétée d'une autre manière : qu'on prenne un corps d'une forme quelconque, qu'on y pratique plusieurs ouvertures cylindriques de deux à trois centimètres de diamètre et d'une profondeur arbitraire ; qu'on isole ce corps, qu'on le charge d'une électricité connue, et qu'on porte adroitement dans l'intérieur des ouvertures un petit cercle métallique tenu à l'extrémité d'un fil de gomme-laque, en prenant bien garde de ne pas toucher les bords de leur ouverture; ce cercle ne se chargera pas d'un atôme d'électricité; car, présenté à un petit pendule déjà chargé de la même électricité, il n'opérera pas sur ce pendule la plus faible répulsion. Mais si l'on met le petit cercle en contact avec la surface extérieure du corps, ou avec le bord d'une des cavités, il repousse vivement la boule du pendule.

On rend encore sensible, par une expérience curieuse, la tendance de l'électricité à se porter à la surface des

corps. Soit *M N* un cylindre conducteur isolé, mobile autour d'un axe horizontal; sur ce cylindre est enroulé un ruban métallique, à l'extrémité duquel est attaché un cordon de soie. Cet appareil communique à un électroscope sensible, composé de deux fils métalliques garnis de boules de moelle de sureau. Si l'on électrise le cylindre et le ruban, aussitôt les deux boules divergent. Alors on déroule le ruban en le tirant par le cordon isolant *D*; on voit les fils se rapprocher, et indiquer l'affaiblissement progressif de leur réaction. L'écart des boules pourrait même devenir insensible, si le ruban était assez long, comparativement à la charge électrique de l'appareil. La divergence a lieu de nouveau, si l'on enroule de nouveau le ruban sur le cylindre. Alors, si le temps est favorable aux expériences électriques, la réaction des fils redevient la même qu'au commencement (*fig.* 175).

Il résulte de ces expériences, qu'on pourrait beaucoup varier, que l'électricité se porte à la surface des corps conducteurs, et ne réside nullement dans leur intérieur. L'expérience nous a encore appris qu'elle n'est retenue à cette surface que par la pression de l'air, et que c'est là le seul obstacle qui l'empêche de quitter les corps (n° 291).

519. Lorsque le corps conducteur est une sphère, la seule raison de symétrie veut que l'épaisseur de la couche électrique soit la même sur tous les points; ce qui est en effet conforme aux expériences.

Quand on accumule sur une sphère des quantités d'électricité de plus en plus grandes, il est indifférent pour les expériences que les nouvelles couches se disposent sous les premières, et augmentent l'épaisseur, ou bien

que, l'épaisseur restant la même, la densité de l'électricité augmente en chaque point.

320. Il nous reste maintenant à rechercher la distribution de l'électricité sur les corps de formes diverses. Le petit disque métallique, isolé par un fil de gomme-laque, peut très-bien nous servir pour cet objet. Il nous fera connaître non-seulement la nature de l'électricité, mais encore la quantité absolue qui se trouve répandue sur chaque partie du corps. A cet effet on le présente au disque mobile de la balance électrique, que l'on a préalablement chargé d'une certaine quantité d'électricité de même nature. La réaction du petit plan sera proportionnelle à sa charge; et, si l'on répète cette épreuve avec le petit disque électrisé à un degré différent, mais sans rien changer à la première charge de la boule mobile, il est visible que les torsions nécessaires pour les ramener à une même distance donneront les rapports des charges (1). Il faut voir maintenant si un petit plan, appliqué sur un corps électrisé, lui enlève une quantité d'électricité proportionnelle à l'intensité de l'élément qu'il touche. Voici comment on s'en assure :

---

(1) En effet, on sait (n° 303) que la réaction électrique de deux corps électrisés est $\frac{E\,E'}{D^2}$; E, la charge du disque mobile, et D la distance des deux disques, sont constantes; il n'y aura que la charge du disque d'épreuve qui variera; et comme $\frac{E\,E'}{D^2}$ fait équilibre à la torsion dans le premier cas, $\frac{E\,E'}{D^2}$ dans le second, on aura, si m, et m' sont les degrés de torsions, $E' : E'' :: m : m'$. Et comme de plus E' et E'' sont proportionnelles aux intensités des points qu'ils touchent, on a le rapport exact de ces intensités.

On place sur un isoloir un corps de figure quelconque, et on l'électrise. On le touche en un point déterminé *b* avec le plan d'épreuve; on porte le plan d'épreuve dans la balance, qu'on a préalablement chargée d'une électricité de même nature; on note la torsion nécessaire pour faire équilibre à la répulsion, à une distance fixe *D*. Soit *B* cette torsion.

On retire le plan d'épreuve, et on lui fait toucher un autre point *b'*, différent du premier. On le porte dans la balance, et l'on observe encore la torsion nécessaire pour balancer la force répulsive à la même distance *D*. Soit *m B* cette torsion; son rapport avec la première sera *m*.

Si, après quelques minutes, on répète les mêmes expériences, en portant toujours le petit plan sur les points *b* et *b'*, on ne trouvera plus les mêmes torsions absolues, à cause de la déperdition de l'électricité par l'air; mais le rapport sera toujours le même. De sorte que si la première est *B'*, la seconde sera *m B'*; il faut nécessairement, pour que la comparaison soit exacte, mettre entre les deux contacts successifs le même intervalle de temps que dans la première expérience, sans quoi la perte de l'électricité ne serait pas proportionnellement la même.

On pourra répéter ces épreuves autant de fois qu'on le voudra, et la proportionnalité des torsions se maintiendra tant qu'il restera de l'électricité sur le corps conducteur.

Ces expériences prouvent que la quantité d'électricité absolue enlevée par le plan d'épreuve à chaque contact, est proportionnelle à la somme actuelle et totale de l'électricité du conducteur. En effet, si l'on a noté les épo-

ques des observations successives, on voit que l'affaiblissement absolu est précisément tel qu'il doit résulter du seul contact de l'air; c'est-à-dire que la répulsion du plan et de la boule mobile, à une époque quelconque, est absolument la même que si on avait mis le plan dans la balance avec la charge primitive d'électricité qu'il avait acquise au point *b*.

321. On prouve la même chose d'une manière plus directe et plus simple.

Soit un cylindre conducteur, isolé et chargé d'une certaine quantité d'électricité. Supposons que la longueur de ce cylindre en surpasse beaucoup la largeur, qu'on porte le plan d'épreuve au milieu de sa longueur, et ensuite à une de ses extrémités, on trouvera deux quantités très-différentes; mais qu'on fasse toucher le cylindre par un autre, de nature, de forme et de dimension exactement semblables, également isolé, le partage se fera certainement d'une manière égale entre les deux corps. Le premier conducteur ne conservera donc que la moitié de son électricité. Si l'on reporte le plan d'épreuve sur les deux mêmes points *b* et *b'*, on trouve que les réactions électriques sont réduites exactement à la moitié de ce qu'elles étaient d'abord.

Il est donc bien démontré par ces expériences que le plan d'épreuve prend des quantités absolues d'électricité proportionnelles à la quantité totale de l'électricité répandue sur la surface des corps, au moment du contact; et quelle que soit cette somme, les quantités prises au même moment sur différens points de la surface, sont entre elles dans un rapport invariable; de là résulte cette conséquence : l'*intensité de l'électricité de chaque point d'une*

surface s'accroît ou décroît dans le même rapprot que la quantité totale d'électricité répandue sur toute la surface.

322. Coulomb a cherché le rapport entre la quantité d'électricité que prend le plan d'épreuve et celle qui se trouve sur l'élément de la surface qu'il touche. Pour cela il a placé sur un isoloir un globe de 8 pouces de diamètre, et il l'a électrisé positivement ainsi que la boule mobile de la balance; il l'a ensuite touché avec un globe dont le diamètre n'était que d'un pouce, et il a porté ce petit globe dans la balance; il fallut une torsion de 144 degrés pour balancer la force répulsive à une distance fixe.

Il a fait ensuite toucher le gros globe par un plan circulaire isolé, de 16 pouces de diamètre, et il a répété l'expériences du petit globe. Cette fois il a suffi d'une torsion de 47 degrés pour faire équilibre à la force répulsive.

Pour bien analyser cette expérience, il faut considérer que les deux globes, ayant des figures tout-à-fait semblables, et se touchant tout-à-fait de la même manière, le partage de l'électricité a dû toujours se faire dans un rapport dépendant seulement de celui de leurs surfaces. Les réactions électriques du grand globe dans les deux expériences ont donc dû être proportionnelles à celles du petit globe, ou à 144 et 47. Et, d'après ce que nous savons sur les formes sphériques, ces nombres peuvent être considérés comme étant dans le rapport des quantités d'électricité répandue sur le grand globe aux deux époques. Ainsi, le globe a perdu, par le contact du plan 144 — 47, ou 97, ce qui est double à peu près de ce qu'il a conservé. Or, la surface d'un globe de 8 pouces de diamètre est

égale à $4 \pi 4^2$; celle d'un plan circulaire de 16 pouces de diamètre est égal à $2 \pi 8^2$; c'est-à-dire double de celle du globe. D'après cela, il paraît que dans le contact tangentiel d'un globe et d'un plan, le partage de l'électricité se fait à peu près proportionnellement aux deux surfaces. Et, d'après d'autres expériences de Coulomb, ce rapport est d'autant plus exact que le plan est plus petit. Ainsi le plan d'épreuve prend une quantité d'électricité double de celle de l'élément qu'il touche; et quand on le reportera dans la balance, vu sa petitesse, son action sur l'aiguille électrisée de la même manière sera la même que celle d'un seul point chargé de la même quantité d'électricité. La torsion du fil lui sera donc proportionnelle, et par suite proportionnelle à l'intensité électrique de l'élément qu'il a touché. On voit donc comment les torsions peuvent donner les rapports d'intensité électrique des différens points d'un corps.

Dans les expériences de ce genre, il est inutile de tenir compte de la quantité d'électricité enlevée par le plan d'épreuve, parce qu'elle est infiniment petite, comparativement à celle de la surface totale du corps.

La perte de l'électricité est toujours plus ou moins grande; il faut nécessairement y avoir égard. C'est ce qu'on peut faire, d'après ce qui précède (n° 305). Mais il vaut encore mieux suppléer à cette correction, en combinant les expériences de manière qu'elles se rectifient elles-mêmes. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de comparer les intensités de deux points *a* et *b* : on fera d'abord toucher le point *a* par le petit plan, puis on observera la réaction proportionnelle qui en résulte dans celui-ci. Ensuite on en fera de même [illegible] *b*, et l'on observera la réaction

correspondante. Alors si entre deux observations il s'est écoulé un certain temps, par exemple trois minutes, on attendra trois minutes et l'on répétera le contact de *a*; en prenant une moyenne arithmétique entre ce dernier résultat et le premier, il est visible qu'on aura des résultats dont le rapport sera le même que si la déperdition de l'électricité était nulle. Ce mode de correction, qui s'opère par des observations correspondantes, est excellent; il est simple et n'exige que des balances d'un petit volume. (*Académie*, 1787, p. 425.)

323. Il convient de porter son attention sur la qualité de la gomme-laque. Celle qui a la couleur sombre paraît la meilleure; il faut cependant la soumettre à quelques épreuves : par exemple, on peut la tirer en fils et présenter ces fils à un conducteur électrisé; s'ils se sont imprégnés d'électricité, il faut les rejeter, et n'admettre que ceux dont l'imperméabilité est complète.

324. Nous rapporterons plusieurs expériences de Coulomb, dans lesquelles ce célèbre physicien a employé la méthode que nous avons décrite.

Il chercha d'abord la distribution de l'électricité sur une lame d'acier de 11 pouces de longueur, de 1 pouce de largeur et de $\frac{1}{2}$ ligne d'épaisseur; afin de pouvoir la toucher dans toute sa largeur, il donna au plan d'épreuve un pouce de long sur trois lignes de large : voici les résultats.

	Torsions observées.	Torsions moyennes au milieu.	Torsions moyennes à un pouce de l'extrémité.	Rapport.
Au milieu	370	360	440	1,22
A 1 pouce de l'ext.	440	350	417,5	1.19
Au milieu	350	335	395	1,18
A 1 pouce de l'ext.	395	—		
Au milieu.	320			Moyenne 1,20

C'est-à-dire que les intensités de l'électricité au milieu et à un pouce des extrémités sont dans le rapport de 1 à 1, 2.

Même lame.

	Torsions observées.	Torsions moyennes au milieu.	Torsions moyennes à l'extrémité.	Rapport.
A l'extrémité	400	198	591	2,05
Au milieu	195	190	590	2,05
A l'extrémité	390	188	579	2,00
Au milieu	188			
A l'extrémité	380			
				Moyenne 2,05

Même lame.

	Torsions observées.	Torsions moyennes au milieu.	Torsions moyennes au-delà du bord.	Rapport.
Au milieu	304	298	1175	3,98
Au-delà du bord	1175	288	1156	4,03
Au milieu	288			
Au-delà du bord	1157			
				Moyenne 4,01

Ainsi du milieu à un pouce du bord l'intensité électrique est sensiblement constante; du milieu à l'extrémité elle croît dans le rapport de 1 à 2; enfin quand le plan d'épreuve est appliqué sur le tranchant de la lame, il donne une intensité quadruple de celle du milieu.

Une autre lame de 22 pouces de longueur, et de mêmes dimensions que la précédente dans tout le reste, a donné exactement le même rapport entre le milieu et les extrémités.

Coulomb conclut de là, 1° que le plan d'épreuve, dans le contact sur les surfaces des lames, ne participe qu'à l'électricité de la face qu'il touche; 2°, qu'au-delà d'une certaine longueur, suffisante pour que l'intensité de l'électricité soit sensiblement uniforme dans une grande partie de sa surface, un nouvel accroissement dans la longueur

n'a plus d'influence sur le rapport des quantités d'électricité accumulées aux extrémités et au milieu, la seconde étant la moitié de la première.

L'accroissement rapide de l'électricité vers les extrémités des lames, ne leur est pas particulier; il s'observe en général dans les corps prismatiques ou cylindriques; il est d'autant plus rapide qu'ils sont plus minces.

Coulomb a fait des expériences semblables aux précédentes avec un cylindre de 30 pouces de longueur, et de 2 pouces de diamètre, terminé par deux demi-sphères.

Résultats.

	Rapport des torsions.
Au milieu et à 2 pouces de l'extrémité,	1, 25
Au milieu et à 1 pouce de l'extrémité,	1, 80
Au milieu et à l'extrémité,	2, 30

Il a trouvé que pour des cylindres très-amincis vers leurs extrémités, l'accroissement est beaucoup plus rapide, et si l'extrémité s'allonge en pointe, l'intensité augmente à tel point que la résistance de l'air ne suffit plus pour la retenir. Nous reviendrons sur ce sujet à l'article des paratonnerres.

Expérience faite avec un plateau de 10 pouces de diamètre.

	Intensités électriques.
Au centre	1
A 1 pouce du centre	1,001
A 2 *id.*	1,005
A 3 *id.*	1,170
A 4 *id.*	1,52
A 4, 5 *id.*	2,07
A 5 *id.*	2,90

La même expérience a été répétée avec des plateaux circulaires différens, et il a été reconnu, comme pour les lames, qu'au-delà d'une certaine étendue, la loi des intensités vers les bords devient la même.

Ces exemples suffisent pour donner une idée de la distribution de l'électricité sur les corps.

Distribution du fluide électrique entre plusieurs corps en contact.

325. Coulomb a fait un grand nombre de recherches sur ce sujet. Nous ne rapporterons ici que celles qui sont relatives aux cas les plus simples. Nous verrons ensuite que les résultats de l'expérience sont d'accord avec la théorie. Coulomb a suivi, pour faire l'étude de la distribution du fluide électrique, la méthode générale dont il a été question au commencement de ce chapitre.

Soient d'abord deux sphères égales, chargées d'une même espèce d'électricité (*fig.* 176), l'électricité est insensible du point de contact jusqu'à 20 degrés.

De 30° en *C* à 90 en *D*, l'intensité électrique augmente dans le rapport de 208 à 1000.

De 60 en *B* à 90 en *D*, l'augmentation se fait dans le rapport de 799 à 1000.

Enfin de 90 à 180, l'accroissement est à peu près insensible, puisqu'il a lieu dans le rapport de 1000 à 1058.

Résultats obtenus avec deux globes inégaux, dont l'un avait un diamètre double de celui de l'autre. Observations faites sur le petit globe.

326. Du point de contact à 30° en *C* (*fig.* 177), élec-

tricité insensible; de 60° (en *B*), à 90° (en *D*), rapport de 588 à 1000.

De 90° (en *D*), à 180° (en *A*), rapport de 1000 à 1333.

L'intensité sur le petit globe au point *D* est à l'intensité au point *D* sur le grand globe, dans le rapport 1,25 à l'unité. M. Poisson a trouvé, par le calcul, 1,24.

Résultats obtenus avec douze globes de 2 pouces de diamètre.

327. Les globes placés à égale distance du milieu sont également chargés d'électricité.

L'intensité du globe extrême est à l'intensité du globe suivant, comme 1,50 est à 1,00; et à l'intensité du globe du milieu comme 1,75 à 100.

La disposition de l'électricité sur un cylindre est peu différente de ce qu'elle se trouve sur une suite de globes égaux.

328. Coulomb a encore cherché la manière dont se fait le partage entre un globe de 8 pouces de diamètre et des cylindres différens en épaisseur, mais de même longueur : il a trouvé que

L'intensité sur le globe étant	1,00.
L'intensité sur un cylindre de deux pouces de diamètre et de 30 pouces de longueur, est	1,30.
L'intensité sur un cylindre d'un pouce de diamètre,	2,00.
L'intensité sur un cylindre de deux lignes de diamètre,	9,00.

Il est clair, d'après ces expériences, que l'intensité électrique sur un cylindre en contact avec un globe sera d'autant plus grande que le diamètre du cylindre sera plus

petit. Et enfin cette intensité pourra s'accroître au point de vaincre la résistance de l'air : ceci fait concevoir le pouvoir des pointes pour lancer le fluide électrique (*Acad. des Sciences*, 1788).

329. M. Poisson a soumis à l'analyse la distribution du fluide électrique à la surface des corps.

D'après ce travail, le fluide électrique doit se tenir à la surface des corps, et n'y former qu'une couche extrêmement mince. La surface extérieure de la couche électrique est la même que celle des corps. La surface intérieure est nécessairement peu différente de la première, puisque la couche électrique est très-mince.

Il est visible que pour que le corps demeure dans un état permanent, la forme de la surface doit être telle, que la couche entière n'exerce ni attraction, ni répulsion sur les points placés dans sa cavité. C'est cette condition analytique qui détermine en général la forme et l'épaisseur de la couche ; l'épaisseur est, en général, inégale.

Sur une sphère, l'épaisseur de la couche est constante. On démontre en effet qu'une semblable couche, dans la loi du carré des distances, n'exerce aucune action sur les points de son intérieur,

Sur un ellipsoïde, l'épaisseur de la couche électrique est variable ; les épaisseurs qui répondent aux sommets des deux axes sont entre elles comme les longueurs de ces axes.

Un des résultats de l'analyse, est que la pression exercée en un point contre l'air est en raison composée de la force répulsive des molécules et de l'épaisseur de la couche en ce point ; et, comme chacun de ces deux élémens est proportionnel à [illegible], il en résulte que la pression exer-

cée contre l'air est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique.

Tous les résultats auxquels l'analyse a conduit M. Poisson, et qui sont de nature à pouvoir être soumis à l'épreuve de l'expérience, ont été pleinement confirmés, et particulièrement par les expériences de Coulomb.

M. Poisson s'est encore occupé de la distribution du fluide sur plusieurs corps électrisés, soumis à leur influence mutuelle. La disposition de l'électricité est assujettie à un principe général, qui a l'avantage de ramener toutes les questions de ce genre à une condition mathématique. En voici l'énoncé :

« Si plusieurs corps conducteurs électrisés, sont mis en présence les uns des autres, et qu'ils parviennent à un état électrique permanent, il faudra, dans cet état, que la résultante des actions des couches électriques qui les recouvrent sur un point quelconque pris dans l'intérieur d'un de ces corps, soit nulle : car si cette résultante n'était pas nulle, l'électricité combinée qui réside au point que l'on considère, serait décomposée, et l'état électrique changerait, contre la supposition que l'on a faite de sa permanence. »

Ce principe évident de lui-même, traduit en calcul, fournit autant d'équations que la question présente d'inconnues. La résolution de ces équations surpasse souvent les ressources de l'analyse. Nous renverrons au mémoire original (*Mém. de l'Institut.*, 1811), les personnes capables de suivre ces profonds calculs.

Des électricités dissimulées. — De leur séparation à distance.

330. Dans tout ce qui précède nous avons considéré les

corps [illegible] trisés par la communication ou par le frottement. Nous nous occuperons, dans cet article, du développement de [illegible] ricité produit à distance par la seule influence d'un corps électrisé.

Pour rendre sensible la décomposition à distance, prenez un cylindre conducteur (*fig.* 178) arrondi à ses extrémités en forme d [illegible] chez-y une suite de petits pendules; touche [illegible] in de le mettre dans l'état naturel; présentez-l [illegible] une distance trop grande pour qu'il y ait e [illegible] corps électrisé *m* : vous observerez les phe [illegible] ans :

La divergence des [illegible] aux extrémités *A* et *B* du cylindre conducteur *n*, prouve qu'il est électrisé.

Au milieu, la divergence est nulle; elle va en augmentant jusqu'aux extrémités.

Le point non électrisé varie de position à mesure qu'on approche ou qu'on éloigne le corps électrisé.

Une petite boule de sureau, dans l'état naturel, suspendue à un fil de soie, présentée aux différens points du cylindre, est attirée partout, excepté au milieu, qui se trouve dans l'état naturel.

La boule électrisée est attirée par une des extrémités et repoussée par l'autre; ce qui annonce que chaque extrémité est chargée d'une électricité particulière.

Si l'on porte le plan d'épreuve successivement sur chacune des extrémités, on reconnaît que l'extrémité la plus voisine du corps conducteur est chargée d'électricité de nature opposée à la sienne, et qu'elle est au contraire de même nature sur la partie la plus éloignée; si l'on enlève le cylindre par ses supports isolans, tous les signes électriques cessent.

Le corps électrisé ne perd rien par l'influence qu'il exerce sur le conducteur cylindrique; ce qu'on reconnaît à l'aide du plan d'épreuve.

On peut reproduire les mêmes phénomènes un grand nombre de fois.

L'expérience précédente réussit avec un conducteur quelconque : il en résulte qu'il faut que les deux électricités existent dans tous les corps, et qu'elles y soient à l'état de combinaison, de manière à se faire équilibre; cet équilibre peut être rompu sans que les deux électricités soient altérées, puisque les mêmes phénomènes se reproduisent toujours de la même manière.

Nous faisons abstraction de la perte de l'électricité; mais, à moins que l'air ne soit très-sec, il y a toujours une perte, et par l'air, et par les supports. Si donc une partie de l'électricité positive du conducteur est repoussée par le corps chargé d'électricité positive avec assez de force pour vaincre la résistance de l'air, ce conducteur cylindrique conserve un excès d'électricité négative, après avoir été soustrait à l'influence du corps électrisé.

Ces faits nous font concevoir pourquoi, dans nos premières recherches sur l'électricité, nous avons reconnu que le corps frotté et le corps frottant se chargeaient toujours d'électricités différentes.

331. Nous avons trouvé que les corps électrisés attirent les corps légers; nous pouvons prouver, par l'expérience, que l'attraction n'a réellement lieu qu'entre les deux électricités de nature contraire. En effet, qu'on suspende à deux fils de soie très-fins deux boules de gomme-laque pure, dont l'une soit revêtue d'une feuille métallique très-mince; qu'on approche de ces deux boules un corps élec-

trisé, par exemple un bâton de cire d'Espagne ou de verre frotté; on verra que dans le premier moment la boule couverte de métal seulement sera attirée : l'autre n'est attirée qu'après un certain temps, lorsque l'électricité s'est décomposée sur sa surface.

332. Si nous supposons que le corps électrisé *m* oppose au mouvement de l'électricité un obstacle invincible, son fluide naturel n'éprouvera aucune décomposition.

Si au contraire il est bon conducteur, les deux électricités du conducteur *n*, devenues libres, agiront à leur tour sur le conducteur *m*, et détermineront la décomposition d'une portion de son fluide naturel : cette décomposition entraînera une nouvelle décomposition dans le corps *n*, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre toutes les forces répulsives et attractives.

Si l'on touche l'extrémité *A* du conducteur *n*, la divergence des fils placés en *A* s'affaiblit, et celle des fils de l'extrémité opposée augmente. Si l'on retire le corps électrisé, on trouvera le corps conducteur *n* chargé d'électricité positive, si le conducteur était chargé d'électricité négative. En effet l'électricité négative étant repoussée, a passé dans les corps environnans; l'électricité positive retenue par la présence du corps électrisé, a donc dû être en excès; et même, si l'on avait opéré le contact avec un conducteur isolé et dans l'état naturel, on aurait également trouvé, après l'éloignement du corps électrisé, le conducteur *n* chargé d'électricité positive, mais à la vérité dans un degré beaucoup plus faible. Cette expérience nous servira plus loin à l'article des condensateurs.

333. Tout ce qui précède montre bien l'action de l'électricité à distance. L'expérience suivante est propre à

donner une idée de l'attraction mutuelle des deux électricités différentes. Qu'on prenne deux disques de verre minces *C D* et *C' D'* (*fig.* 179) bien plans, d'environ cinq pouces de diamètre; qu'on attache chaque disque à un manche isolant de verre, recouvert de cire d'Espagne; qu'on frotte les deux disques l'un contre l'autre, en les tenant par les manches isolans, et qu'on les présente toujours en contact à un pendule formé d'une petite boule de sureau suspendue à un fil de soie, il ne se manifestera aucune attraction; mais qu'on les présente successivement, le pendule sera attiré par tous les deux. Si le pendule est préalablement électrisé, on verra que l'un est chargé d'électricité positive, et l'autre d'électricité négative. Dans le cas de la réunion des deux disques, leurs actions sur le pendule se détruisant, leur résultante est nulle, et voilà pourquoi le pendule reste en repos.

On peut encore varier l'expérience. Qu'on présente un des disques du pendule, à l'instant il sera attiré; si l'on approche le second disque du premier, on verra le pendule s'éloigner peu à peu et enfin reprendre sa position verticale au moment du contact des deux plateaux.

De l'Électrophore.

334. L'électrophore a été imaginé par Wilck, savant suédois. Cet instrument est composé d'un gâteau de matière résineuse, bien uni, sur lequel on place un plateau de métal, garni d'un manche de verre (*fig.* 180).

La théorie de l'électrophore nous offre une application de la théorie des influences électriques.

On frappe d'abord le gâteau de résine avec une peau

de chat; ensuite on place le plateau métallique sur la résine : l'électricité négative, développée par le frottement sur la résine, décompose le fluide naturel du plateau métallique, attire l'électricité positive, et repousse l'électricité négative. Si donc l'on touche avec le doigt le plateau métallique, l'électricité négative sera chassée dans le sol, tandis que l'électricité positive sera retenue par l'électricité négative du gâteau de résine; et, à cause de l'imperméabilité de cette dernière, la combinaison ne pourra pas s'opérer. Il résulte de là que si l'on enlève d'abord le doigt, et ensuite le plateau métallique, en le tenant par le manche isolant, on le trouvera chargé d'électricité positive, et il donnera une forte étincelle à l'approche d'un corps conducteur. Le gâteau de résine conservant toute son électricité, cette expérience peut se répéter un grand nombre de fois : de là la dénomination d'*électrophore* ou porteur d'électricité.

Souvent l'expérience précédente ne réussit pas complètement, et surtout dans les temps humides : alors l'électricité se perd à mesure qu'elle se développe. C'est pourquoi, lorsqu'on veut se servir de l'électrophore, on a soin d'en chauffer toutes les parties.

La résine est ordinairement renfermée dans une enveloppe de tôle. L'électricité de cette enveloppe est décomposée par l'électricité de la résine; de manière que l'électricité négative de celle-là sera chassée dans le sol, et son électricité positive sera attirée dans la partie inférieure du plateau. Si maintenant l'on approche le plateau métallique, et qu'on le touche avec le doigt pour qu'il communique avec le sol, l'électricité positive de l'enveloppe agira par répulsion sur l'électricité positive du plateau métalli-

que, et sera repoussée elle-même; de sorte que si l'on touche l'enveloppe, une portion d'électricité positive passera dans le sol, et l'on aura le maximum de charge.

L'électrophore est d'un emploi fréquent dans les laboratoires de chimie. Veut-on enflammer un mélange détonnant, par exemple un mélange d'air et d'hydrogène renfermé dans un eudiomètre (*fig.* 181), on touche le bouton *a* avec le plateau métallique électrisé; l'étincelle électrique passe à travers le mélange et l'enflamme; c'est une petite machine électrique fort commode, puisqu'il suffit de frotter de temps à autre le gâteau de résine pour se procurer de fortes étincelles.

335. La lampe électrique est une application de l'électrophore (*fig.* 182).

Cette lampe se compose d'un vase en verre, en partie plein d'acide sulfurique étendu d'au moins quinze parties d'eau; un cylindre de zinc y est suspendu à un fil de platine; d'abord le zinc plonge dans le liquide; le gaz hydrogène se développe; on le laisse dégager par le robinet *R*, qu'on ouvre à dessein. Au bout d'un certain temps de dégagement, on le ferme, le gaz hydrogène, par sa pression, fait monter le liquide dans la partie supérieure *O*, de sorte que bientôt le zinc se trouvant hors du contact de l'acide, le dégagement n'a plus lieu. Le gaz hydrogène, comprimé par la colonne de liquide *A B*, s'échappe par la première issue qu'on lui offre. Maintenant un électrophore est disposé, dans la partie inférieure *C D* de l'appareil, de manière qu'en même temps qu'on ouvre le robinet, on soulève le plateau métallique; et une tige de métal en communication avec le plateau isolé d'autre part, lance sur une tige voisine, communiquant avec le sol, une étin-

celle électrique, à travers le mélange d'air et d'hydrogène; ce dernier s'enflamme et brûle pendant tout le temps qu'il se dégage; on peut se servir de cette lampe pour enflammer une bougie, etc. On fabrique aujourd'hui beaucoup de ces lampes auxquelles on a donné une forme très-élégante.

Sur un point du gâteau de résine est une petite bande de métal communiquant avec le sol, de sorte que le plateau métallique abandonne au sol l'électricité négative, repoussée par l'électricité de même nature de la résine.

DES CONDENSATEURS.

336. La bouteille de Leyde, la batterie, et le condensateur proprement dit, sont des instrumens dans lesquels on accumule l'électricité, et qui conséquemment peuvent être appelés condensateurs.

En 1782 Volta fit connaître un nouvel instrument; cet instrument est destiné à réunir de très-petites quantités d'électricité. Il est formé d'un plateau métallique, et d'un plateau d'une substance qui tient le milieu entre les mauvais et les bons conducteurs, par exemple, de marbre (*fig.* 183). Supposons donc que le disque métallique étant placé sur un plateau de cette substance, on fournisse un faible degré d'électricité négative au plateau métallique; l'électricité négative décomposera l'électricité naturelle du plateau de marbre, de manière à attirer l'électricité positive et à repousser l'électricité négative. Le marbre agira à son tour sur l'électricité négative du plateau, et neutralisera sa force répulsive, de sorte qu'on pourra fournir au plateau métallique une nouvelle portion d'électricité négative, qui décomposera une nouvelle portion du fluide naturel du marbre, et ainsi de suite. On voit donc qu'on accumule ainsi dans le plateau métallique de petites quantités de fluide négatif. Et si ensuite on l'enlève, il donnera une étincelle à l'approche du doigt; il agira sur un pendule déjà électrisé, de manière qu'on pourra constater la nature de l'électricité. Le plateau inférieur doit

être formé par une substance assez conductrice pour que son fluide naturel soit décomposé par la faible quantité d'électricité que reçoit le plateau métallique; d'une autre part, il doit opposer assez d'obstacle au mouvement de l'électricité, pour que le fluide positif du plateau métallique qu'il attire à lui, ne puisse pas pénétrer dans son intérieur.

337. L'autre condensateur produit des effets beaucoup plus puissans que l'instrument que nous venons de décrire. Le condensateur dont il va être question n'est autre chose que la bouteille de Leyde sous une forme plus simple.

Il consiste en deux plateaux métalliques semblables au plateau supérieur de l'électrophore, et séparés l'un de l'autre par une lame d'une substance non conductrice.

Ainsi on pourrait former un condensateur en séparant deux lames métalliques par une lame de résine très-mince, par une étoffe de soie, ou même simplement par une lame d'air, c'est-à-dire, en mettant les deux plateaux à une certaine distance l'un de l'autre. Mais dans le condensateur ordinaire (*fig.* 184), la lame de séparation est une lame de verre. Pour rendre commode l'usage de cet instrument, on donne au plateau inférieur un pied solide *B*, en lui laissant cependant son manche de verre qu'on recouvre d'ailleurs d'une couche de gomme-laque afin d'augmenter sa propriété isolante; et l'on en fait autant pour le manche du plateau supérieur. Veut-on charger cet instrument, on pose sur le plateau inférieur la lame de verre *LL'*, et sur cette lame le second plateau; au moyen de tiges ou de chaînes métalliques on établit la communication entre le plateau inférieur et le réservoir

commun, puis entre le plateau supérieur et le conducteur d'une machine électrique. Le plateau supérieur est appelé plateau collecteur, parce que c'est en effet sur ce plateau que s'accumule toute l'électricité de la machine. Pour fixer les idées, supposons que la machine électrique produise de l'électricité positive. Cette électricité se répandra d'abord également sur le conducteur de la machine et sur le plateau supérieur du condensateur. Mais vu le peu d'épaisseur de la lame de séparation LL', cette électricité positive décompose par influence le fluide naturel du plateau inférieur, attire le fluide négatif à la surface de ce plateau en contact avec la lame LL', et repousse dans la partie opposée le fluide positif qui se dissipe dans le sol par le moyen de la chaîne de communication. Alors le fluide positif du plateau collecteur qui attire ce fluide négatif est également attiré par ce dernier, et ces deux fluides se neutralisant en partie l'un l'autre, l'équilibre est détruit entre le collecteur et le conducteur de la machine. Le fluide positif que cette machine développe continuellement peut donc s'écouler dans le plateau supérieur; il décompose de nouvelles portions du fluide naturel du plateau inférieur, en chassant dans le sol le fluide positif, et en attirant toujours le fluide négatif. On voit donc qu'il se condense de part et d'autre sur les deux plateaux de l'instrument de grandes quantités d'électricités négative et positive. De sorte qu'après un certain temps, en faisant communiquer par un excitateur le plateau inférieur et le plateau supérieur, ces deux électricités se précipiteront l'une vers l'autre pour former du fluide naturel, et par leur réunion produiront une forte étincelle.

Nous avons dit qu'on établissait la communication entre le plateau inférieur et le réservoir commun. On voit en effet que cette condition est de toute nécessité; car sans cette précaution, l'électricité positive du plateau inférieur retiendrait l'électricité négative de ce plateau, et repousserait l'électricité positive du plateau supérieur. En sorte qu'on ne pourrait pas charger le condensateur, ou du moins on ne le chargerait que très-faiblement.

Qu'on fasse en effet l'expérience en laisant le plateau inférieur isolé, on verra que lorsque l'on réunira par un conducteur métallique ces deux plateaux, il n'y aura qu'une faible étincelle produite par l'électricité du plateau supérieur, au moment où celle-ci se répandra sur les deux plateaux.

Comme l'électricité positive du plateau supérieur n'agit qu'à distance sur l'électricité négative du plateau inférieur, et que d'ailleurs l'intensité de l'électricité décroît dans le rapport direct du carré de la distance, il est évident que cette électricité positive du collecteur est plus grande que l'électricité négative qu'elle retient sur le plateau inférieur; c'est-à-dire que si l'on combinait ensemble ces deux quantités d'électricités différentes, il n'en résulterait pas seulement du fluide naturel, mais il y aurait un excès d'électricité positive. Par la même raison, l'électricité positive du plateau supérieur l'emporte de beaucoup sur l'électricité positive du plateau inférieur qu'elle chasse dans le sol. Il reste donc toujours sur le plateau supérieur un excès d'électricité. On peut le reconnaître par l'expérience : il suffira d'approcher successivement d'un pendule chargé d'une électricité connue, les deux plateaux séparés par une lame de verre. On pourrait croire

qu'il est possible d'augmenter indéfiniment cet excès, et par conséquent la charge du conducteur. Mais il n'en est pas ainsi, et l'on arrive à la limite lorsque cet excès est égal à la quantité que pourrait contenir à saturation le plateau supérieur, s'il était simplement en communication avec le conducteur de la machine, c'est-à-dire s'il ne faisait pas partie du condensateur. En effet, cet excès n'étant pas attiré par l'électricité négative du plateau inférieur est totalement libre, et n'est maintenu sur le plateau collecteur que par la pression atmosphérique. Or, quand il est égal à la quantité d'électricité que prendrait ce collecteur, s'il était seul, on ne peut plus l'augmenter, puisque l'air n'en peut retenir que cette quantité.

Dans cet instrument, une grande quantité d'électricité se trouve engagée dans la lame de séparation. Car, si toute l'électricité résidait dans les deux plateaux seulement, en établissant directement leur communication, on les déchargerait complétement; or c'est ce qui n'arrive pas, puisqu'on obtient encore plusieurs autres petites décharges. On peut démontrer ce fait d'une manière plus évidente. On isole l'instrument après l'avoir chargé, c'est-à-dire qu'on détruit la communication du plateau inférieur avec le sol, et du plateau supérieur avec le conducteur de la machine. On enlève ensuite le collecteur, et on le décharge de son électricité, puis on enlève la lame de dessus le plateau inférieur en la tenant par le bord, et on décharge également le plateau inférieur. Après quoi on replace la lame de verre, sans lui donner une nouvelle quantité d'électricité, et le condensateur se trouve encore chargé presqu'autant que si l'on n'avait pas enlevé les armures. Cette expérience prouve évidemment qu'une por-

tion de l'électricité réside dans les deux surfaces de la lame de verre : les deux fluides de nature opposée s'y sont engagés par leur tendance mutuelle à se réunir.

On appelle *force condensante* du condensateur le rapport qui existe entre la quantité d'électricité du plateau collecteur à la limite, quand il fait partie du condensateur, et celle qui s'y trouverait, s'il était isolé. Représentons par V la quantité d'électricité positive contenue sur le plateau collecteur à la limite extrême, et par R la quantité d'électricité négative retenue sur le plateau inférieur par l'influence de V. Nous avons vu que l'on a toujours $V > R$, c'est-à-dire que V est toujours plus que suffisant pour neutraliser complétement R. Donc, R ne retient qu'une partie de V ; et, si on touche le collecteur avec le doigt, on devra nécessairement en tirer une étincelle ; ce qui arrive en effet. Soit V' la quantité d'électricité positive qui y reste après ce contact : $V - V'$ sera évidemment la quantité d'électricité que l'on a enlevée par l'étincelle, et par conséquent celle qui n'était retenue sur le plateau supérieur que par la pression atmosphérique. Mais il est clair que cette dernière n'est autre chose que celle que prendrait ce plateau s'il ne faisait pas partie du condensateur. Donc, d'après la définition, $\frac{V}{V-V'}$ mesure la force condensante du condensateur. Dans cette valeur V' est inconnu. Pour le déterminer, posons $\frac{R}{V} = m$ (m étant nécessairement une fraction, puisque l'on a $R < V$), de cette équation, on tire $R = m\,V$. Or, le rapport de R à V ne dépend que de la distance des deux plateaux ; cette d[illegible] reste constante, puisqu'on em-

ploie toujours la même lame de séparation. Donc le rapport de V à R doit être le même que celui de R à V'; et par conséquent on a $\frac{V'}{R} = m$, d'où l'on tire $V' = m\,R$; mais on a déjà trouvé $R = m\,V$: donc $V' = m^2\,V$. Donc la force condensante est représentée par $\frac{V}{V - m^2 V}$, ce qui revient à $\frac{1}{1 - m^2}$.

D'où l'on voit que pour calculer la force condensante du condensateur, il suffit de connaître m ou le rapport de R à V. C'est à quoi l'on parvient très-aisément. Pour cela, on charge le condensateur de manière à ce que, les deux plateaux étant séparés l'un de l'autre, il ne se produise pas d'étincelles dans l'air. Cela fait, après avoir opéré toutefois la séparation des deux plateaux, on touche le plateau collecteur avec un petit disque métallique isolé par un tube de verre enduit de gomme-laque : ce petit disque lui enlève une partie de son électricité. On porte le petit disque ainsi électrisé dans la balance de torsion : à l'instant l'aiguille mobile, qu'on suppose préalablement chargée d'une quantité déterminée d'électricité de même nature, est repoussée d'un certain nombre de degrés : on répète la même expérience pour le plateau inférieur, et on observe attentivement les deux mouvemens de l'aiguille. Soit a le nombre de degrés de torsion observé dans le premier cas, a' le nombre correspondant observé dans le second, $\frac{a'}{a}$ est le rapport de R à V. En effet, $\frac{a'}{a}$ repésente le rapport des quantités d'électricité contenues dans deux portions éga-

les des deux surfaces des deux plateaux (n° 319); or, ces quantités sont proportionnelles à R et V : car, les deux plateaux du condensateur étant égaux entre eux, sont composés d'un même nombre de points symétriquement placés. Par conséquent les quantités d'électricité contenues sur deux de ces points sont proportionnelles aux quantités totales. Donc, enfin, $\frac{a'}{a} = \frac{R}{V} = m$.

Puisque l'électricité positive du plateau collecteur est plus que suffisante pour neutraliser l'électricité négative du plateau inférieur, il en résulte qu'après la décharge du condensateur, il restera sur l'instrument une certaine quantité d'électricité positive; la détermination en est facile à faire (1).

338. Nous avons vu tout à l'heure que V' était plus que suffisant pour neutraliser R, ce qui nous a fait conclure avec raison qu'en présentant le doigt au plateau collecteur, l'instrument étant d'ailleurs parfaitement isolé, on devait en tirer une étincelle; cette étincelle une fois produite, il reste une quantité V' d'électricité positive sur le collecteur; mais alors R est plus grand que V', puisqu'il

(1) Soit L la quantité d'électricité positive libre sur le collecteur, $\frac{L}{1-m^2}$ représentera la quantité de l'électricité accumulée sur ce plateau, et par conséquent $\frac{mL}{1-m^2}$ sera la quantité d'électricité négative retenue sur le plateau inférieur. Donc $\frac{L}{1-m^2} - \frac{mL}{1-m^2}$ ou $\frac{L}{1+m}$ représente la quantité d'électricité restant sur l'instrument après la décharge, et chaque plateau en aura $\frac{L}{2(1+}$

neutralise entièrement V' à distance : donc V' ne retient qu'une partie de R, le reste est maintenu par la pression de l'air, et par conséquent on doit tirer une étincelle du plateau inférieur. C'est en effet ce qui arrive, et après cette étincelle, il reste sur ce même plateau une quantité R' d'électricité négative ; mais V' est plus grand que R', par la même raison que nous avons déjà donnée ; donc on doit tirer encore une étincelle du plateau supérieur, et ainsi de suite : on voit qu'en s'y prenant de cette manière, le condensateur donne un grand nombre d'étincelles successives, lesquelles finissent nécessairement par le décharger.

Dans ces deux décharges successives, les quantités d'électricité qui restent sur chacun des plateaux, après chaque décharge partielle, décroissent chacune de leur côté. Elles suivent dans leur décroissement une loi très-remarquable (1).

---

(1) En effet, nous avons reconnu qu'on avait $\frac{V'}{R} = m$, et il est évident, d'après ce que nous avons dit, qu'en représentant par V'', V''', V^{IV}..... les restes successifs d'électricité positive, et par R'', R''', V^{IV}, les restes d'électricité négative, nous aurons la suite d'équations :

$\frac{R}{V} = m$, $\frac{V'}{R} = m$, $\frac{R'}{V'} = m$,..... d'où $V'' = m^2 V$, $R' = m V'$ $= m^3 V$,... etc.

Les restes successifs d'électricité positive sont $m^2 V$, $m^4 V$, $m^6 V$, $m^8 V$....., les restes successifs d'électricité négative sont $m^3 V$, $m^5 V$, $m^7 V$, $m^9 V$..... D'ailleurs, le rapport m étant fractionnaire, les puissances de ce rapport sont de plus en plus petites. Donc les quantités d'électricité qui restent sur chaque plateau du condensateur, après chaque décharge partielle, forment deux progressions géométriques décroissantes dont la raison commune est m^2.

339. Pour décharger un condensateur on a une verge métallique, recourbée en arc, terminée par deux boules, et fixée à un manche de verre couvert de cire d'Espagne (*fig.* 185). C'est ce qu'on appelle un excitateur; on tient le manche dans la main, l'on porte une des boules sur l'armure inférieure, et l'autre sur l'armure supérieure.

340. Quand on emploie une lame de verre, il faut toujours la chauffer et bien l'essuyer avec du linge chaud, parce que le verre est sujet à se couvrir d'humidité. Le

---

Les pertes d'électricité qu'éprouve successivement chaque plateau dans ces décharges partielles, forment aussi deux progressions géométriques décroissantes, dont la raison est la même et égale à m^2. En effet la première perte éprouvée par l'électricité positive est évidemment $V-V'$, la seconde $V'-V''$, la troisième $V''-V'''$, la quatrième $V'''-V^{iv}$, et ainsi de suite; de même, la première perte faite par l'électricité négative est $R-R'$, la seconde $R'-R''$, la troisième $R''-R'''$, la quatrième $R'''-R^{iv}$, et ainsi de suite. Donc, en remplaçant V', V'', V''', V^{iv}..... R', R'', R''', R^{iv}..... par leurs valeurs respectives obtenues ci-dessus, on aura pour les premières pertes, $V(1-m^2)$, $m^2 V(1-m^2)$,....; et pour les secondes, $mV(1-m^2)$, $m^3 V(1-m^2)$, $m^5 V(1-m^2)$...., ce qui est conforme à l'énoncé.

D'ailleurs on peut faire à ce sujet une vérification fort simple, qui consiste à réunir toutes les pertes successives faites par l'électricité positive, et toutes les pertes successives éprouvées par l'électricité négative, et à voir si la première somme est égale à l'électricité positive qui se trouvait sur le plateau supérieur, et si la seconde est égale à toute l'électricité négative qui était retenue à la surface du plateau inférieur. En effet, on trouve pour la première somme, $V(1-m^2)(1+m^2+m^4+\ldots)$, et pour la seconde $mV(1-m^2)(1+m^2+m^4+\ldots\ldots)$ Or $1+m^2+m^4+\ldots$ est le développement de $\frac{1}{1-m^2}$. Donc la première somme donne $\frac{V(1-m^2)}{1-m^2}$, ce qui est égal à V, et la seconde somme $\frac{mV(1-m^2)}{1-m^2}=mV=R$, comme on devait le trouver.

taffetas se recouvre moins d'humidité que le verre; mais il présente un inconvénient, c'est de dégager de l'électricité par la seule pression des plateaux, de sorte qu'il ne donne pas des résultats comparables. Lorsqu'on ne veut pas porter très-loin la charge du condensateur, on se contente d'appliquer sur le plateau inférieur une couche de vernis, comme nous le verrons plus loin à l'article de l'électromètre condensateur.

De la bouteille de Leyde.

341. La bouteille de *Leyde* fut découverte en 1746, par Muschenbroeck et Cunéus. Cette découverte fit beaucoup de bruit en Europe; elle donna un nouvel éclat à l'électricité; chacun fut empressé d'éprouver la commotion, malgré le récit effrayant qu'on en faisait. Tous les physiciens répétèrent la fameuse expérience de Leyde, et en étudièrent les diverses circonstances. Ce fut surtout parmi les Français, toujours avides de nouvelles découvertes, que cette expérience excita une vive sensation; l'abbé Nollet donna en présence du roi la commotion à un régiment entier.

La théorie de la bouteille de Leyde est absolument la même que celle du condensateur. Les calculs que nous avons faits à l'occasion de ce dernier instrument lui sont entièrement applicables.

La forme ordinaire de la bouteille est celle d'un flacon à col renversé, rempli de feuilles minces de cuivre (*fig.* 186). La surface extérieure est recouverte, jusqu'à une certaine hauteur, d'une feuille d'étain. La bouteille a un bouchon de liége traversé par une tige *a b* de métal, dont la partie supérieure est terminée par une boule, et

dont la partie inférieure communique avec les feuilles de cuivre.

Pour charger la bouteille de Leyde, on la tient ordinairement dans la main, en même temps qu'on fait toucher le conducteur de la machine électrique, à la boule de la tige; et on la retire quand l'électromètre à cadran, posé sur la machine électrique, marque que l'intensité de l'intérieur de la bouteille, ainsi que celle de la machine, est arrivée au maximum.

Alors, si l'on touche la boule *a* avec un doigt de l'autre main, aussitôt on se sent frappé avec violence dans les deux bras, et surtout aux articulations. Plusieurs personnes peuvent recevoir à la fois la commotion; il suffit qu'elles se tiennent par la main. La personne qui se trouve à une extrémité de la chaîne prend la bouteille dans la main, tandis que celle qui touche le bouton *b* est à l'extrémité opposée; la transmission de l'électricité se fait avec tant de vitesse, que toutes les personnes se sentent frappées au même instant. Nous avons vu que le condensateur doit être en communication avec le sol, pour qu'il se charge; il en est de même de la bouteille de Leyde : aussi placez-la sur un isoloir, mettez sa garniture intérieure en communication avec la machine électrique, vous verrez que, dès les premiers tours de la machine, l'électromètre à cadran marquera la limite de la charge. Si vous réunissez les deux garnitures, vous ne produisez pas d'étincelles. L'expérience réussit encore mieux en attachant la bouteille au conducteur de la machine. Dans ce cas, la perte éprouvée par la garniture extérieure n'a lieu que par l'air, et si ce dernier est très-sec, la perte est faible.

On prouve que dans la bouteille de Leyde, aussi-bien que dans le condensateur, les électricités dissimulées ne résident pas dans les armures. A cet effet on a une bouteille dont le col a la même largeur que la base, et dont les deux armures peuvent être séparées. Si l'on charge fortement une semblable bouteille, et qu'on la place sur un isoloir, on pourra enlever les deux armures, les toucher afin de les mettre dans l'état naturel, sans affaiblir la commotion ou l'étincelle quand on les replacera.

342. La bouteille de Leyde est propre à montrer le rôle que joue l'air dans les phénomènes électriques. Qu'on place sous le récipient d'une machine pneumatique, une bouteille fortement chargée, et qu'on fasse le vide; avant que le vide soit complet, les deux électricités se réunissent; on aperçoit même une trace lumineuse, si l'expérience est faite dans l'obscurité.

Nous avons dit que le plateau du condensateur, qui était en communication avec la machine électrique, se chargeait d'un excès d'électricité; il en est de même pour la bouteille de Leyde. On le voit en attachant au crochet *a b* un petit électroscope, formé par deux fils de lin, terminés chacun par une balle de moelle de sureau (*fig.* 187). Les deux boules divergent même après qu'on a posé la bouteille sur un isoloir. Je suppose qu'on l'ait chargée comme il a été indiqué plus haut. Si l'on touche le crochet *a b*, on enlève l'excès de fluide maintenu par la seule pression de l'air; les deux boules se mettent en contact; l'autre portion d'électricité positive que le doigt n'a pas enlevée est neutralisée par l'électricité négative de la garniture extérieure; dernière doit être à son tour en excès, puis-
[illegible] à distance l'électricité de la garniture

intérieure. Aussi, un électroscope en communication avec la garniture extérieure diverge-t-il fortement. Si l'on touche la garniture extérieure, l'excès d'électricité est enlevé, l'électroscope de l'intérieur diverge, et ainsi de suite.

343. Comme l'imperméabilité du verre n'est pas complète, il y a toujours une certaine quantité d'électricité qui le pénètre. Au moment de la décharge de la bouteille, cette électricité reste engagée dans le verre, et ne contribue pas à l'effet produit : mais peu à peu elle se dégage; aussi, souvent des personnes qui, croyant la bouteille déchargée, la prennent sans précaution, éprouvent une forte commotion.

344. On se sert souvent de la bouteille de Leyde pour se procurer telle ou telle espèce d'électricité. Par exemple, si l'on veut de l'électricité positive, on chargera la bouteille comme nous l'avons indiqué, il suffira de faire toucher le corps par le crochet. Avec la bouteille ainsi chargée, si l'on désire de l'électricité négative, on la posera sur un isoloir et l'on touchera le crochet; l'excès d'électricité de l'intérieur, maintenu par la pression de l'air, passera dans les corps environnans, l'armure extérieure contiendra un excès d'électricité négative; de sorte que pour électriser un corps négativement, il suffira de le mettre en contact avec l'armure extérieure.

Un physicien, nommé Mauduyt, a disposé la bouteille de manière à avoir la décharge à une distance déterminée. Cette disposition est représentée dans la figure 188. *a b* est un conducteur isolé, de l'intérieur, mais communiquant avec l'extérieur; ce conducteur peut être approché plus ou moins de la boule de l'intérieur.

Charge par cascade.

345. On suspend une première bouteille par sa boule au conducteur d'une machine électrique; à un crochet fixé sous cette bouteille, on en suspend une seconde, et ainsi de suite (*fig.* 189). Au crochet de la dernière bouteille est attachée une chaîne établissant la communication avec le sol. Si l'on fait jouer la machine électrique, l'électricité positive s'accumulera dans l'intérieur de la première bouteille, décomposera l'électricité naturelle de la garniture extérieure, attirera l'électricité négative, et repoussera l'électricité positive dans l'intérieur de la seconde bouteille, dont l'armure extérieure sera négative, et ainsi de suite, de façon que toutes les armures extérieures seront chargées d'électricité négative. Si l'on réunit la dernière armure avec l'intérieur de la première bouteille, on les déchargera toutes à la fois; et il est visible que la commotion sera moins forte qu'avec une seule bouteille.

On augmenterait considérablement la commotion si l'on enlevait chacune des bouteilles, et si on les plaçait sur une même lame conductrice, en réunissant par une chaîne les armures intérieures, qui, comme le montrent le raisonnement et la figure, sont toutes électrisées positivement. Les bouteilles étant ainsi disposées, si on établissait la communication de l'intérieur de l'une quelconque avec le corps conducteur sur lequel leurs armures extérieures reposent, la décharge serait complète.

On obtiendrait un effet beaucoup plus considérable en réunissant ainsi les bouteilles pour les charger, qu'en char-

ou d'or, à fondre ces tubes et à amincir les fils autant que possible. L'effet est d'autant plus marqué, que les fils sont plus ténus.

Le même physicien vit qu'un papier de tournesol placé entre deux fils qui déchargeaient une bouteille de Leyde, devint rouge près du fil positif, et reprit sa teinte primitive lorsque la partie de papier rougie fut exposée au courant négatif. En substituant une dissolution de cuivre au papier de tournesol, le fil négatif fut bientôt recouvert de cuivre : ce métal disparut par le renversement du courant électrique. (*Phys. trans.*, 91.) *Voyez* la pile.

La reconnaissance des physiciens a consacré une fort jolie expérience à Franklin, dont les travaux sur les sciences font tant d'honneur à l'esprit humain.

On place une feuille d'or entre deux planches qu'on serre fortement; la feuille d'or repose sur un carton découpé de manière à présenter le profil du portrait de Franklin; la feuille d'or réduite en poudre, par la décharge électrique, laisse sur un ruban de soie, placé sous le carton, une empreinte brunâtre qui représente assez bien le portrait.

Des électroscopes.

348. Les électroscopes sont de petits instrumens destinés à découvrir les plus petites quantités d'électricité. Tous ces instrumens sont fondés sur le principe général de la répulsion qui s'exerce entre des corps chargés d'une même espèce d'électricité.

Le plus simple de tous les électroscopes est le pendule, dont nous nous sommes servi un grand nombre de fois. Cet électroscope consiste en une petite boule de moelle de

sureau, suspendue à un fil de soie, sans torsion, attaché à un support en verre (*fig.* 191).

On a imaginé un grand nombre d'électroscopes. Ce sont ordinairement deux brins de paille, ou deux minces lames d'or, ou enfin deux fils métalliques terminés par des boules de sureau très-légères. Supposons que nous employions les deux boules, et que nous les placions dans un bocal, afin de les défendre de l'agitation de l'air. On vernit le col avec de la gomme-laque afin que l'isolement soit plus parfait. On prend souvent un vase sur l'une des faces duquel on trace une division. On tourne le sommet de la tige à laquelle sont attachés les fils métalliques, de manière que l'écartement se fasse parallèlement à la division. Une plus grande, ou une moindre amplitude indiquera un plus ou moins grand degré d'électricité; mais comme l'action de la pesanteur tendant à ramener les fils dans la verticale, augmente à mesure que les fils sont plus obliques, il s'ensuit que la force répulsive des boules n'est pas proportionnelle à leur écart. Ces sortes d'instrumens ne sont donc pas propres à mesurer l'énergie de l'électricité; il faut pour ce dernier objet avoir recours à la balance électrique (n° 297).

349. Supposons maintenant qu'il s'agisse de reconnaître la nature de l'électricité dont une substance est chargée. On donnera d'avance aux boules une électricité connue. Pour cela, on approchera de la tige un bâton de verre, frotté avec une étoffe de laine. L'électricité naturelle des boules et de la tige sera décomposée, l'électricité négative sera attirée par l'électricité positive du tube de verre, et l'électricité positive sera repoussée; de sorte que si l'on touche la tige avec le doigt, l'électricité positive passera

dans les corps environnans; et, si ensuite on retire le bâton de verre, l'électricité négative libre déterminera la divergence des boules.

Maintenant tout corps électrisé qui, présenté à une certaine distance des boules, en augmentera la divergence, sera évidemment chargé d'électricité négative. Au contraire un corps chargé d'électricité positive diminuera la divergence, parce qu'il attirera l'électricité négative.

350. Parmi tous les électroscopes qui ont été imaginés, il en est un dont les effets sont indépendans de l'action de la gravité; c'est celui de Coulomb.

Cet instrument a beaucoup de ressemblance avec la balance électrique. Il est représenté dans la *fig.* 192.

C c fil de soie, suspension de quatre pouces de longueur, est tendu par une épingle *a b*, du poids de trois grains. L'épingle est attachée au fil de soie par un fil de gomme-laque : *p c l* est une aiguille de gomme-laque, tenant à son extrémité un cercle de clinquant *l*. A la hauteur de l'aiguille, dans la paroi de la cloche de verre, est fixé un fil métallique *r q*, scellé dans un tube de verre avec de la gomme-laque. L'extrémité du fil, qui se trouve dans l'intérieur, porte une boule de sureau enveloppée d'une feuille d'or. Un cercle de papier divisé en parties égales et collé sur le verre, permet d'apprécier la distance du clinquant mobile *L* et de la boule fixe *r*. A l'aide d'un micromètre établi sur le couvercle, on donne au fil une position déterminée. Si l'on approche de l'extrémité du fil un bâton de cire d'Espagne électrisé négativement par le frottement d'une peau de chat, l'aiguille horizontale, chargée préalablement d'électricité négative, sera repoussée; la répulsion cessera si l'on éloigne le bâton de

cire d'Espagne. Veut-on rendre la répulsion permanente, qu'on touche l'extrémité *q* avec le doigt, qu'on le retire d'abord et le bâton ensuite; l'explication de cette répulsion vient d'être donnée dans le numéro précédent. La pesanteur ne contrarie ici en aucune manière la répulsion électrique; par le moyen du micromètre supérieur, on peut toujours ramener le cercle mobile à une distance fixe.

351. L'électroscope de Behrens, perfectionné par M. Bohnenberger, est le plus sensible qu'on connaisse aujourd'hui; il consiste en deux piles sèches (*fig.* 193), composées chacune de 400 disques de papier d'or et d'argent de trois lignes de diamètre, contenus dans un tube de verre verni. Chaque pile est terminée à sa partie inférieure par un anneau de laiton et rivée au couvercle du vase, de manière à sortir un peu en dehors. Le couvercle est en laiton, le vase est en verre. Le couvercle est traversé à son centre par un tube en verre, verni en dedans et en dehors; ce tube est traversé par un fil de laiton, qui porte à son extrémité inférieure une lame d'or battu, et à son extrémité supérieure une boule de même nature que lui. La feuille d'or étant, dans l'état naturel, également attirée par les deux piles, ne fait aucun mouvement. Mais aussitôt qu'elle est électrisée, elle est attirée successivement par l'une et repoussée par l'autre, jusqu'à ce qu'elle se précipite sur l'une des deux.

L'électroscope dont il s'agit réunit l'avantage d'une grande sensibilité à celui d'indiquer immédiatement la nature de l'électricité du corps; cette électricité est de nature opposée à celle du pôle par lequel la feuille d'or est attirée.

Electromètre-condensateur.

352. Volta, en réunissant un électroscope au condensateur, a formé un instrument auquel il a donné le nom d'électromètre-condensateur. C'est à l'aide de cet instrument qu'il a pu déterminer l'électricité développée par le contact (*fig.* 194). La partie qui fait l'office d'électroscope est composée de deux brins de paille *a b* et *c d*. On les suspend au moyen de deux fils métalliques très-déliés et terminés en crochet. Ces deux fils sont attachés à l'extrémité d'une pièce de métal qui, par son extrémité opposée, est soudée à un plateau métallique *C D*. La pièce de métal à laquelle sont fixés les fils, se visse sur l'obturateur du flacon ; le plateau est recouvert sur la face supérieure d'une couche mince de vernis : le même plateau est garni inférieurement d'un fil métallique terminé par une petite boule *k*. Ce plateau a reçu le nom de collecteur, parce que son objet est de recueillir de très-petites quantités d'électricité, qu'on veut rendre sensibles par leur accumulation. Sur ce premier plateau en est un second, auquel est attaché un cylindre de verre *j h*, et qui est en communication avec le sol au moyen d'une tige métallique *s v*. Il serait moins avantageux de faire communiquer le plateau inférieur avec le sol. (Voyez *le condensateur*.)

Supposons maintenant qu'on veuille accumuler dans les pailles de l'électromètre-condensateur l'électricité qui ne se produit qu'en très-petite quantité dans un phénomène. On touchera le bouton *k* avec le corps supposé électrisé. L'électricité se répandra sur le plateau dont ce bouton

fait partie. Supposons que ce soit de l'électricité positive; il se fera une décomposition dans le fluide naturel du plateau supérieur; de manière que le fluide positif sera chassé dans le sol par le moyen de la tige métallique *s v*, tandis que le fluide négatif sera attiré par le fluide positif fourni au bouton *k*; on pourra répéter ce contact un certain nombre de fois; et si l'on enlève le plateau supérieur, le fluide positif du plateau inférieur devenu libre, déterminera la divergence des pailles. Il sera d'ailleurs toujours facile de reconnaître la nature de l'électricité qui se trouve dans les pailles.

De la lumière électrique.

353. On a remarqué depuis long-temps qu'un corps électrisé répand une faible lumière dans l'obscurité; de plus, qu'un corps électrisé, s'il est conducteur, donne une étincelle brillante à l'approche du doigt ou de tout autre corps conducteur.

Quelle est la cause de ce dégagement de lumière? A l'origine on pensa que le fluide électrique était lumineux par lui-même. Ensuite on en chercha l'explication dans le choc subit qu'éprouve l'air par le passage du fluide électrique. Voyons d'abord si l'air est choqué par le passage du fluide électrique. L'instrument qui sert à cette épreuve est de l'invention de Kinnersley. Il est formé d'un tube de verre d'un pouce de diamètre intérieur et de 4 à 5 pouces de hauteur; à chaque extrémité est une virole en cuivre bien mastiquée, afin qu'une légère compression ne puisse pas déterminer le dégagement de l'air intérieur (*fig.* 195).

La virole supérieure reçoit une tige métallique terminée par une boule; cette tige est mobile; elle peut être avancée dans le tube jusqu'à une ligne de distance d'une tige semblable, fixée à la virole inférieure. Le tube renferme du liquide; au tube principal est adapté un second tube latéral et recourbé à angle droit; le niveau du liquide est à-peu-près le même dans les deux tubes. Si l'on fait passer une étincelle à travers l'air du grand tube, on voit le liquide monter et descendre aussitôt dans le tube latéral. L'air est donc choqué par le passage du fluide électrique. Et comme nous savons que dans le choc des gaz il y a dégagement de lumière, il faut attribuer à la condensation de l'air une partie de la lumière dégagée; nous disons une partie, car il nous paraît aussi démontré que la combinaison des deux électricités contribue à ce dégagement. D'abord, on sait, d'après sir H. Davy, que si l'on réunit les deux extrémités d'une pile énergique par un charbon, ce charbon rougit et même devient incandescent. Et comme l'expérience réussit parfaitement quand le charbon est placé dans le gaz azote, ce n'est pas un effet de combustion. D'ailleurs, le charbon n'éprouve pas le moindre changement dans son aspect extérieur. Ce grand dégagement de chaleur et de lumière est donc le résultat de la réunion des deux électricités. On peut ajouter que, lorsqu'on approche un corps conducteur dans l'état naturel, d'un corps conducteur électrisé, la combinaison de l'électricité de ce dernier avec l'électricité de nature contraire de l'autre conducteur, a toujours lieu.

L'accroissement de l'intensité de la lumière, à mesure que l'air est plus dense, ne serait pas une objection valable contre cette opinion.

354. Il nous reste à rapporter quelques observations qui se rattachent au sujet dont nous nous occupons. La lumière électrique varie dans son aspect, selon que le conducteur électrisé est chargé de telle ou telle espèce d'électricité. Est-il chargé d'électricité positive et armé d'une pointe, il donne, à l'approche d'un conducteur en communication avec le sol, une belle aigrette lumineuse. Chargé d'électricité négative, au contraire, il ne fait apercevoir qu'un point lumineux.

La lumière électrique devient d'autant plus faible que l'air est plus rare. On fait, à cette occasion, quelques expériences qui reviennent toutes à-peu-près à la suivante : on prend un long tube de verre, terminé d'un côté par une virole en cuivre, de l'autre, par un robinet, qu'on ferme aussitôt qu'on a fait le vide; on présente ensuite la virole du tube au conducteur d'une machine électrique, en même temps qu'on le tient avec la main par le robinet; on voit paraître un flot d'une lumière purpurine, qui remplit le tube, et dure aussi long-temps que la machine électrique reste en mouvement.

L'expérience peut être faite de plusieurs manières. Par exemple, dans un tube de verre, disposez de petites bandes d'étain, en ayant soin de laisser entre elles un intervalle : l'électricité donne une étincelle par son passage de l'une à l'autre, et peut produire des effets de lumière très-variés.

355. L'expérience que nous avons tout à l'heure rapportée sur la forme des aigrettes semble annoncer que l'électricité positive traverse plus facilement l'air que l'électricité négative : voici une autre expérience qui conduit à la même conséquence. Qu'on place une carte entre deux con-

ducteurs terminés en pointe, et qu'ayant fait toucher l'armure extérieure d'une batterie par l'un, on fasse toucher l'armure intérieure par l'autre, la batterie sera ainsi déchargée à travers la carte, qui sera percée, non pas au milieu de la ligne de jonction des deux pointes métalliques, mais près de la pointe négative. Une nouvelle expérience de M. Trémery semble, selon lui, servir de confirmation à la première. En effet, quand on met l'appareil sous une machine pneumatique, et qu'on fait le vide, comme l'a pratiqué ce savant, on trouve qu'à un certain degré de raréfaction la carte est percée presqu'au milieu de la ligne de jonction des deux pointes. On pourrait cependant objecter que la résistance diminue dans le même rapport pour les deux électricités.

Électricité atmosphérique.

356. Franklin a découvert, en 1752, l'identité de l'électricité ordinaire avec celle des nuages; cette admirable découverte, et l'invention des paratonnerres, ont immortalisé son nom dans les sciences.

Avant lui, on avait bien soupçonné quelque analogie entre les effets de nos machines et ceux de la foudre, mais jamais aucun physicien n'avait conçu la pensée de décharger les nuages de leur électricité; et même l'abbé Nollet, un des physiciens les plus distingués du siècle dernier, ne croyait pas à la possibilité de décharger les nuages par les pointes métallique (*Lett.* 7e, 1752).

La plus grande similitude existe entre les effets de nos machines et ceux de la foudre. Les animaux tués par nos batteries électriques se putréfient avec la même prompti-

tude que les animaux foudroyés. Les effets mécaniques sont les mêmes; l'action des deux électricités sur les corps, la forme des étincelles, tout est pareil de part et d'autre.

Franklin, voulant soumettre ses idées à l'épreuve de l'expérience, lança, près de Philadelphie, vers un nuage électrisé, un cerf-volant armé d'une pointe. Le cerf-volant était déjà depuis quelque temps en présence du nuage, sans donner de signes d'électricité; Franklin commençait à désespérer du succès, lorsqu'une pluie étant survenue, la corde de chanvre avec laquelle il tenait le cerf-volant se mouilla, et propagea assez d'électricité pour qu'il en pût tirer des étincelles (mois de juin 1752).

Dans une nouvelle expérience il plaça une barre de fer sur sa maison, et y attacha deux clochettes, afin d'être averti du moment où la barre serait chargée d'électricité. Le premier essai de ce genre réussit le 12 avril 1753.

Pendant que Franklin suivait ses idées en Amérique, les physiciens d'Europe se livraient à de nombreux essais sur le même sujet.

Dalibard fit construire à Marly-la-Ville, près de Paris, une cabane sur laquelle il plaça une barre de fer de quarante pieds de longueur, et isolée dans sa partie inférieure; cette barre, lors du passage du nuage, fit entendre un bruit semblable à celui du tonnerre; après le passage d'un nuage à une petite distance, elle donna des étincelles à l'approche du doigt. Cette remarquable expérience contribua puissamment à établir l'identité de l'électricité des nuages et de celle de nos machines (*Lett.* 7e).

La pluie rendait imparfait l'isolement de barres semblables; Canton, en Angleterre, imagina de placer au-des-

sus du support isolant un chapeau en métal. Le support étant ainsi à l'abri de la pluie, la barre conservait l'électricité qu'elle avait enlevée aux nuages ou à l'air. A l'aide de cet appareil, il reconnut que certains nuages sont chargés d'électricité positive, tandis que d'autres le sont d'électricité négative; il put ainsi constater que la pluie, la neige, électrisaient également la barre. Pour s'affranchir du soin de visiter sans cesse la barre, et souvent sans utilité, il imagina d'y attacher un petit appareil fort ingénieux, que représente la figure 196. Cet appareil est appelé carillon électrique; il est composé de trois timbres A A' et A'', attachés à une même tige métallique. A, A', A'' sont suspendus, le premier par un fil de soie, et chacun des deux autres par une chaîne. Le timbre du milieu communique avec le sol par un conducteur métallique. Des boules de métal sont suspendues à des fils de soie entre ces timbres. L'électricité de la barre se communique aux timbres extrêmes; ces timbres, étant électrisés, attirent les boules métalliques, et les repoussent successivement; ces boules vont frapper le timbre du milieu, qui les remet dans l'état naturel, et ainsi de suite. Ces oscillations continuelles des boules métalliques font sonner les timbres, et l'observateur est averti de la présence d'un nuage.

M. de Romas faisait, vers la même époque (1753), l'expérience du cerf-volant d'une manière beaucoup plus parfaite. Il entrelaçait la corde du cerf-volant de fil de fer; et, pour se mettre à l'abri des décharges imprévues, il terminait la corde par un cordon de soie de huit à dix pieds. Il tirait les étincelles de la corde par le moyen d'un excitateur à manche isolant, dont une des extrémités communiquait au sol, tandis que l'autre touchait la corde.

Ayant dirigé cet appareil ainsi perfectionné vers un nuage orageux, il en tira des étincelles de plus de dix pieds de longueur, et qui faisaient autant de bruit que des coups de pistolet. Voyez dans quels termes il rendait compte de cette expérience à l'abbé Nollet. (*Académie des Sciences*, 26 août 1756.)

Les expériences sur l'électricité atmosphérique ne doivent être tentées qu'avec beaucoup de précaution. On sait que le célèbre professeur Richmann, de Pétersbourg, fut renversé sans vie, au moment où il approchait la tête d'une tige métallique isolée qu'il avait placée sur sa maison (en 1753).

357. Avant de nous occuper des paratonnerres, nous ferons connaître les moyens simples et exacts par lesquels on constate la présence de l'électricité dans l'atmosphère.

La plus simple consiste dans l'emploi d'un électroscope sensible, armé d'une verge de métal pointue, d'un mètre de longueur; cette verge est ordinairement composée de plusieurs pièces qui s'emboîtent les unes dans les autres (*fig.* 197). A l'aide de cet instrument on reconnaît que l'atmosphère, lorsqu'elle est pure, est, en général, chargée d'électricité positive. Mais cet état est modifié par les moindres nuages et les moindres brouillards. L'expérience prouve que cette électricité habituelle croît en intensité, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. Aussi la rend-on beaucoup plus sensible quand, à l'exemple de Saussure, on jette en l'air une boule pesante, attachée à un fil très-fin, et dont l'extrémité inférieure touche la tige de l'électroscope. Lorsque le fil est développé, il communique à l'électroscope l'électricité de la couche atmosphé-

rique qu'il touche; mais par la continuation du mouvement le fil se détache, et l'électroscope conserve l'électricité qu'il a acquise. Pour isoler le vase de l'électroscope, il est bon de le placer dans une cloche en verre, dont l'air est desséché par des fragmens de chaux vive.

Le fait de la présence de l'électricité positive dans l'atmosphère pendant un temps serein a été vérifié par un grand nombre de physiciens.

Des Paratonnerres.

358. D'après les vues de Franklin, on a placé sur les édifices de longues verges métalliques dont l'extrémité inférieure plonge dans le sol : c'est là ce qu'on appelle *paratonnerres*. (Voyez *fig.* 198.)

L'utilité des paratonnerres a été d'abord vivement contestée; on avait pensé qu'ils étaient plus propres à provoquer la chute de la foudre sur un édifice qu'à la prévenir; mais l'expérience a prononcé, et leur utilité est aujourd'hui généralement reconnue. On a présenté à l'Académie des Sciences, il y a un certain nombre d'années, une pointe de paratonnerre qui avait reçu une explosion si forte, qu'elle avait été fondue, et cependant l'édifice sur lequel elle était placée n'avait pas éprouvé la moindre commotion, quoique le bruit eût été effroyable. Que fait donc le paratonnerre? La présence d'un nuage produit la décomposition de son électricité, chasse dans le sol l'électricité de même nature, et attire à la pointe l'électricité de nature opposée. L'intensité de l'électricité à la pointe du paratonnerre doit être d'autant plus grande, que l'action du nuage est plus forte; et lorsque la pression, toujours

proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique, est capable de vaincre la résistance de l'air, l'électricité se combine avec une portion de l'électricité du nuage, et, cet effet se répétant, ce dernier finit par être déchargé; le nuage même est attiré par la verge métallique, et s'éloigne ensuite quand il est déchargé, comme M. Charles l'a vu plusieurs fois avec des cerfs-volans.

L'efficacité des paratonnerres étant bien constatée, voyons leur construction.

La tige est une barre en fer, amincie de sa base à son sommet. Sa hauteur moyenne est de 7 à 9 mètres (21 à 27 pieds); le côté de sa base est de 54 à 60 millimètres (24 ou 26 lignes).

Vu la facile oxidation du fer par le contact de l'air humide, on retranche de la partie supérieure une longueur de 55 centimètres (20 pouces), et on la remplace par une tige conique de cuivre jaune, dorée à son extrémité, ou mieux encore, terminée par une aiguille de platine de 5 centimètres (2 pouces) de longueur. La soudure est faite à l'argent, et elle est encore solidifiée par un petit manchon de cuivre. La tige de cuivre est réunie à la tige de fer au moyen d'un goujon qui entre à vis dans tous les deux.

La tige est fixée sur l'édifice de la manière que l'exige la localité. Le conducteur se replie le long du toit, et ensuite le long du mur; il s'enfonce dans un puits, ou dans un trou de 4 à 5 mètres (12 à 15 pieds), si l'on ne rencontre pas l'eau.

Afin de préserver le pied du paratonnerre de la rouille, on le fait passer dans un auget rempli de charbon de bois; cet auget est formé par des briques. L'expérience a prouvé

que du fer ainsi entouré de braise, n'éprouve aucune altération dans l'espace de trente années. Le charbon de bois, fortement calciné, a encore un autre avantage, c'est qu'il est bon conducteur de l'électricité. Le conducteur, à la sortie de l'auget, perce le mur du puits dans lequel il doit descendre; son extrémité est terminée par deux ou trois racines, pour faciliter l'écoulement de l'électricité.

Dans un terrain sec, on donne une profondeur au moins double à la cavité qui reçoit le conducteur, qu'il faut avoir soin d'entourer de braise.

Il est utile de choisir pour le pied du paratonnerre, l'endroit le plus humide autour de l'édifice, et de diriger au-dessus les eaux pluviales, afin de l'entretenir dans un état constant d'humidité.

Les barres de fer qui forment le conducteur, présentant, en raison de leur rigidité, quelque difficulté pour lui faire suivre le contour des édifices, on a imaginé de les remplacer par des cordes métalliques formées de fils. On réunit quinze fils de fer pour faire un toron, et quatre de ces torons forment la corde, qui a alors de 16 à 18 millimètres (7 à 8 lignes) de diamètre. Pour prévenir l'oxidation du métal, on entoure chaque toron d'une couche de goudron.

Si l'édifice renferme des pièces métalliques un peu considérables, comme des lames de plomb qui recouvrent le faitage et les arêtes des toits, des gouttières, etc., il est bon de les faire communiquer au paratonnerre.

L'expérience semble indiquer qu'une tige de paratonnerre protége efficacement contre la foudre, autour d'elle, un espace circulaire d'un rayon double de sa longueur.

D'après cette règle, un édifice de 40 mètres (120 pieds) serait défendu par une tige de 10 mètres (30 pieds).

Un édifice de 20 mètres (60 pieds) n'exigerait qu'un paratonnerrre de 5 mètres (15 pieds) de hauteur.

Lorsqu'on place deux paratonnerres sur le même édifice, il suffit de leur donner un conducteur commun. En général chaque paire de paratonnerres exige un conducteur; quel que soit le nombre des paratonnerres, on les rendra tous solidaires, en établissant une communication intime entre les pieds de toutes les tiges.

On doit toujours faire parvenir la foudre dans le sol, par le chemin le plus court.

(Nous empruntons ces détails particuliers, sur la construction des paratonnerres, à un rapport adopté par l'Académie des Sciences, et rédigé par MM. Lefevre-Gineau, Girard, Poisson, Dulong Fresnel, et Gay-Lussac, rapporteur. (*Ann. de ch. et de phys.*, t. 26, année 1824.)

Les bâtimens isolés ont encore été garantis de la foudre par des conducteurs plus ou moins inclinés sur leurs différentes faces, et dirigés contre les lambeaux de nuages, qu'un coup de vent violent précipiterait sur quelqu'une de ces faces.

D'après les expériences rapportées à l'article des batteries, il est clair que des paratonnerres trop minces fondraient totalement, et ne rempliraient pas leur objet. Il n'est pas d'exemple de la fusion d'un paratonnerre ayant l'épaisseur prescrite plus haut.

Nous ajouterons encore quelques expériences, afin de détruire les objections qu'on pourrait former contre l'utilité des paratonnerres.

N'est-on pas fondé à éprouver quelque effroi en pensant

qu'on dormira près de la barre métallique qui doit conduire la foudre? N'est-il pas imprudent de diriger ce météore à travers des magasins à poudre? Aucun de ces dangers n'est à craindre, si le paratonnerre n'offre point de solution de continuité : car c'est une propriété constante de l'électricité de suivre les meilleurs conducteurs; ainsi l'on décharge impunément une forte batterie, en tenant dans la main le conducteur métallique qui réunit ses deux armures. Un oiseau qui touche le même conducteur dans une expérience analogue, ne ressent aucun effet. La poudre qui enveloppe l'excitateur, n'éprouve pas la moindre altération.

Cependant en faisant ces expériences on éprouve quelquefois une commotion instantanée qui est incomparablement plus faible que celle de la batterie : c'est là le choc latéral. Par exemple, si l'on présente un pistolet de Volta à proximité du conducteur au moment de la décharge d'une forte batterie, il peut y avoir explosion. Le choc latéral est d'autant plus faible, que le conducteur a de plus grandes dimensions. On est donc le maître de l'atténuer autant qu'on le désire.

Du choc en retour.

359. On a vu souvent, dans les momens d'orage, des hommes et des animaux tomber morts subitement, à l'instant d'une explosion, quoique la foudre eût éclaté à une grande distance du lieu où ils se trouvaient. Voici l'explication qu'on a donnée de ce phénomène.

Soit *A B C* (*fig.* 199) le nuage chargé d'électricité négative; soit placée en *R* une personne à une assez petite dis-

tance du nuage, pour que la décomposition du fluide naturel de ses organes ait lieu; l'électricité positive sera attirée par le nuage, et l'électricité négative repoussée dans le sol. Si, dans le moment où la personne sera fortement chargée d'électricité positive, un objet *D* détermine l'explosion du nuage, l'électricité négative, qui avait été repoussée dans le sol, rentrera subitement dans la personne, et produira une secousse capable de donner la mort.

DE L'ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR LE CONTACT.

360. L'année 1789 donna naissance à la découverte d'une nouvelle branche de l'électricité, qui reçut le nom de *galvanisme*. Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, faisait des recherches sur l'irritabilité nerveuse; il vit un jour une grenouille suspendue par la moelle épinière à un crochet en cuivre, éprouver des convulsions quand les muscles touchaient un autre métal posé sur le cuivre. Cette expérience fut variée d'une infinité de manières; il crut y reconnaître la preuve de l'existence d'une électricité animale. D'après cet anatomiste le muscle était le siége des deux électricités; la surface extérieure se trouvait dans l'état négatif, tandis que l'intérieure était dans l'état positif; les nerfs ne faisaient que l'office de conducteurs; l'électricité positive passait de l'intérieur du muscle, d'abord dans le nerf, et ensuite dans l'arc excitateur; ce dernier la transmettait à la surface extérieure du muscle. (*Histoire du Galvanisme.*)

361. Cette opinion reçut l'approbation d'un grand nombre de savans. Cependant Volta démontra par des expériences rigoureuses que l'électricité était produite par le contact des deux métaux, et que l'animal n'éprouvait de convulsions que parce qu'il établissait par ses organes la communication entre les deux électricités positive et négative développées par le contact. Voici quelles sont ces expériences. Elles peuvent toutes se réduire à trois prin-

cipales, sur lesquelles il est important d'arrêter son attention, parce qu'elles servent de fondement à la construction et à la théorie de la pile.

1°. Prenant deux disques circulaires, l'un de zinc et l'autre de cuivre, isolés par des manches en verre, on les met en contact, et l'on porte ensuite l'un des deux disques, celui de cuivre, par exemple, sur le plateau collecteur de l'électromètre condensateur. Si l'on répète cette expérience un certain nombre de fois, on trouve de l'électricité positive dans l'électromètre après avoir enlevé le plateau supérieur du condensateur, et le conducteur qui établit la communication entre le sol et ce plateau, ce qui fait voir que le cuivre était chargé d'électricité négative. Le zinc eût donné une électricité de nature opposée; car, dans le contact, comme dans un mode quelconque de développement d'électricité, les deux fluides sont toujours produits à la fois. On peut se dispenser d'établir la communication entre le sol et le plateau supérieur du condensateur, pourvu qu'on touche à la fois chaque plateau avec l'un des disques (1).

L'assemblage de deux lames est une petite machine électrique; le contact fait passer dans le zinc le fluide positif, et dans le cuivre le fluide négatif jusqu'à ce qu'il y ait

(1) Volta généralisa le principe que le contact de deux substances hétérogènes quelconques produit la décomposition du fluide naturel. Le fait n'est facilement démontré par l'appareil des deux plateaux, que lorsqu'il s'agit des métaux. Mais la possibilité de construire des piles avec deux substances quelconques, équivaut à des expériences directes, qui n'ont pas de succès avec des corps autres que les métaux, parce que le développement de l'électricité ne peut être rendu sensible par l'électromètre-condensateur.

équilibre entre la force qui produit la décomposition de l'électricité naturelle et l'action attractive des deux fluides.

On pourrait penser que la production de l'électricité est une suite de la pression établie entre le zinc et le cuivre. Pour détruire cette objection il suffit de souder les deux métaux ensemble, comme on le voit dans la figure 200. Si l'on touche ensuite le plateau inférieur du condensateur que nous supposons en cuivre pur, avec la partie cuivre, on trouvera l'électromètre chargé de fluide positif; si l'on fait l'expérience en tenant cette double lame par le cuivre et en mettant le zinc en contact avec le plateau du condensateur, on ne trouve aucune quantité d'électricité dans l'électromètre; cependant la pression est la même dans les deux cas. Dans la première expérience, les deux disques étant isolés, doivent chacun retenir des quantités de fluide électrique parfaitement égales et de nature contraire, le condensateur sera chargé par l'un ou l'autre disque séparé. Mais dans la seconde expérience, l'un des deux disques étant en communication avec le réservoir commun, se met dans l'état naturel, l'autre disque peut se recouvrir d'une quantité d'électricité plus considérable, c'est absolument la même chose que pour la machine électrique, dont les conducteurs et le plateau de verre se recouvrent d'une quantité d'électricité bien plus grande quand les coussins communiquent avec le sol, que lorsqu'ils sont isolés. Si le disque de cuivre touche le plateau inférieur du condensateur, une portion du fluide négatif qui le recouvre se portera dans le plateau, et sa tension électrique sera diminuée; la lame zinc fournira, par le secours du sol, l'électricité nécessaire pour le remettre dans son état primitif; de sorte que si le plateau supérieur

de l'électromètre condensateur communique avec le sol, cet instrument enlevera l'électricité à la lame cuivre, jusqu'à ce que la tension électrique soit la même et sur le plateau inférieur du condensateur et sur la lame qu'il touche.

2°. Le résultat sera bien différent si le cuivre communique avec le sol, et si le zinc touche le plateau du condensateur; quelque prolongé que soit le contact, l'électromètre ne donnera pas le plus petit signe d'électricité. Cette expérience est tout-à-fait d'accord avec la précédente. En effet, l'électricité négative du cuivre s'écoule dans le réservoir commun; l'électricité positive qui recouvre le zinc augmente, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi. L'équilibre ne sera nullement changé si une seconde lame de cuivre touche la lame zinc; c'est le cas de notre dernière expérience. Ainsi le plateau inférieur restera dans l'état naturel; il en sera nécessairement de même de l'électromètre. Nous avons supposé dans ces deux dernières expériences le plateau inférieur du condensateur formé de cuivre pur complétement identique avec la lame cuivre du petit système, qui nous a servi pour développer l'électricité par le contact. Il faut bien faire attention à cette circonstance, car si ce plateau était en zinc, les résultats seraient inverses.

3°. L'électromètre se chargera dans la dernière expérience, si le point du plateau en cuivre du condensateur, que doit toucher la lame de zinc, est recouvert d'une feuille de papier humide, ou de tout autre corps semblable; alors le contact n'existant plus entre le cuivre et le zinc, le fluide positif, développé sur ce dernier métal, se répandra sur le plateau supérieur du condensateur, et conséquemment l'électromètre sera chargé d'électricité

négative. Cette dernière remarque est très-importante: elle contribuera beaucoup à faire concevoir la théorie de la pile.

Construction et théorie de la pile.

362. Il sera bien facile, d'après ce qui précède, d'entendre la construction de la pile voltaïque. Supposons qu'on place un disque de zinc z sur un disque de cuivre de pareille forme en communication avec le sol, ce dernier disque sera dans l'état naturel; le disque de zinc se recouvrira de fluide positif. Représentons-en la quantité par la lettre e; plaçons sur le disque zinc un cercle de carton mouillé, et sur ce carton un second disque de cuivre c'; le zinc partagera son électricité avec le disque c', et en reprendra au disque inférieur c, qui en reprendra lui-même au sol. Il est visible que le partage ne s'arrêtera que lorsque le disque de cuivre c' aura aussi une quantité e de fluide positif. Tout cela est d'accord avec les expériences fondamentales. Plaçons un second disque zinc z' sur le disque cuivre c'. Les deux métaux agissant toujours de la même manière, quel que soit leur état, il en résulte que la lame zinc z' devra se recouvrir d'une quantité e d'électricité de plus que la lame cuivre c', qui en contient déjà e; ainsi, la lame zinc z' se chargera de $2\,e$ de fluide positif. En continuant les superpositions, on voit que la dernière lame zinc contiendra ne de fluide positif, et la dernière lame cuivre $ne - e$ (*fig.* 201) lorsqu'on représente par n le nombre des lames d'une même espèce.

En sorte que les quantités d'électricité du zinc seront e, $2\,e$, $3\,e$....., $n\,e$.

Celles du cuivre correspondantes, o, e, $2e$...,$(n-1)\,e$.

La somme de ces deux progressions arithmétiques est $\frac{(e+ne)\,n}{2}+\frac{(ne-e)\,n}{2}$ ou $n^2\,e$, ce qui exprime que la somme totale de l'électricité est proportionnelle au carré du nombre des élémens.

La tension ne du dernier élément est proportionnelle au nombre des élémens et ne dépend nullement des dimensions des élémens, ce qui est conforme à l'expérience. Ainsi deux piles dont les élémens sont très inégaux en grandeur, mais égaux en nombre, ont la même tension à leur sommet.

Il est nécessaire de distinguer ce qui est hypothétique, de ce qui est donné par l'expérience : d'abord, nous regardons l'influence du conducteur humide comme à peu près nulle. Cette supposition est peu éloignée de la vérité ; car jusqu'à présent il a été reconnu que l'électricité développée dans le contact des liquides et des solides est extrêmement faible. Nous admettons ensuite que la différence entre les quantités d'électricité des deux métaux en contact, est toujours la même. Il paraît en effet qu'il en est ainsi ; car les résultats auxquels on parvient par cette hypothèse sont vérifiés, d'une manière générale du moins, par l'expérience. Ainsi, l'on trouve que l'intensité du sommet de la pile croît avec le nombre des disques ; c'est le résultat indiqué par la progression arithmétique qui exprime l'état électrique de la pile.

Chaque disque est appelé élément ; l'assemblage de deux élémens a reçu le nom de paire.

La pile que nous venons de construire est totalement chargée d'électricité positive ; elle n'aurait été chargée que d'électricité négative, si l'extrémité zinc eût communiqué

avec le sol. Sans l'emploi des conducteurs humides, tous les élémens auraient la même charge électrique, qui serait égale à celle qui se développe par le contact de deux élémens. Cet état est indiqué par la figure.

363. On peut aussi laisser la pile isolée par ses deux extrémités; alors une moitié est chargée de l'électricité positive, l'autre moitié n'a que de l'électricité négative. La condition à laquelle doit satisfaire une pile isolée, c'est que toutes les quantités d'électricité des différens élémens étant réunies, se détruisent, puisqu'elles proviennent de la décomposition d'une portion de l'électricité naturelle de cette pile, opérée sans le concours des corps environnans.

Soient deux élémens isolés : la différence entre les deux élémens étant constante, et la somme totale nulle, le disque de zinc z aura $+\frac{e}{2}$ d'électricité positive, et le disque de cuivre aura la même quantité d'électricité négative, que nous exprimerons par $-\frac{e}{2}$. Si nous ajoutons une seconde paire, en la séparant de la première par un cercle de carton mouillé, cette pile devra satisfaire à la condition de donner une somme nulle, quand on réunit toute l'électricité développée. Cette pile de quatre élémens aura à son extrémité zinc $+e$ d'électricité positive; à son extrémité cuivre, $-e$ d'électricité négative. Les deux élémens du milieu seront dans l'état naturel.

Quel que soit le nombre des paires, les deux élémens extrêmes, et en général les élémens situés à égale distance du milieu, ont des quantités d'électricité égales, et de signe contraire. De plus, quand le nombre est divisible

par 2, les deux élémens du milieu sont dans l'état naturel (1).

La pile que nous venons de décrire, et les expériences sur lesquelles elle est fondée, sont dues à Volta de Pavie. On verra par la suite quels services ce savant célèbre a rendus aux sciences, par la découverte de son admirable instrument.

Diverses piles.

364. Les premières piles étaient verticales; elles étaient appelées piles à colonne. Cette disposition a été abandon-

---

(1) Soit n le nombre des couples d'une pile isolée. Soit x la tension de l'électricité de la première lame zinc; $x-e$ sera la tension de la lame cuivre qu'elle touche; la deuxième lame zinc en communication avec la lame de cuivre par le conducteur humide, aura la même tension $x-e$; la seconde lame $x-2e$, etc. L'état de la pile isolée sera donc tel que les élémens zinc auront les tensions x, $x-e$, $x-2e$, $x-(n-1)e$; et les élémens cuivre $x-e$, $x-2e$, $x-ne$. La somme de ces deux progressions doit être nulle, puisque les deux électricités positive et négative se trouvent dans la pile, on aura donc $\frac{[2x-(n-1)e]n}{2}+\frac{[2x-(n+1)e]n}{2}=0$ ou $2nx-n^2e=0$, d'où $x=\frac{ne}{2}$ est la quantité d'électricité libre qui se trouve sur le premier élément zinc. $x-ne$ ou $-\frac{ne}{2}$ est celle qui se trouve sur l'élément cuivre de l'autre extrémité de la pile. Ainsi les deux élémens extrêmes ont la même charge au signe près. En général, $x-(m-1)e$ étant la quantité libre de l'élément zinc placé au rang m; celle de l'élément cuivre du rang m à l'extrémité opposée sera $x-ne+(m-1)e$.

Ces deux expressions deviennent, par la substitution de la valeur de x, $\frac{ne}{2}-(m-1)e$, et $-\frac{ne}{2}+(m-1)e$, la première est la même que la seconde, au signe près.

née parce que le poids des disques supérieurs fait sortir le liquide des conducteurs humides, et que bientôt la pile est hors de service.

C'est pour éviter cet inconvénient qu'on a imaginé les piles à auge. Dans ces piles, les élémens sont placés et soudés deux à deux dans une auge en bois (1); chaque paire est séparée de la paire adjacente par un tube en verre qui a la forme d'un *U* et qui est entouré d'un mastic isolant; les trois côtés de chaque paire situés dans l'auge, sont enveloppés par du mastic semblable, de sorte que la pile est isolée naturellement. Le conducteur humide est un liquide versé dans les intervalles des différentes paires (*fig.* 202). On voit que la pile à auge ne présente pas l'inconvénient que nous avons signalé dans la pile à colonne, mais elle ne réunit pas encore toutes les conditions qu'on doit désirer. L'expérience a appris que les acides puissans sont nécessaires pour faire produire à la pile des effets énergiques : mais ces acides attaquent et usent promptement les plaques. Il est donc utile de soustraire, dans l'intervalle des expériences, ces plaques à l'action du liquide. La disposition indiquée par la figure 203, remplit cette condition.

Chaque plaque *A B* est une paire; la partie *A* est en

(1) Les piles construites jusqu'à présent, diffèrent réellement de celles que la théorie conçoit. Le zinc est soudé au cuivre à l'aide de l'étain. De sorte que l'état électrique du cuivre et du zinc est peut-être très-différent de ce qu'il serait si le contact était établi sans le secours d'un autre métal. A la vérité ce contact devait être assez difficile à obtenir; car un artiste assez habile, à qui j'avais commandé une semblable pile, n'a pu l'exécuter.

cuivre, et la partie *B* est en zinc. Par le moyen de la barre *H K* en bois, on abaisse et on élève les plaques. Quand la pile plonge dans le liquide, chaque petite auge renferme deux élémens de deux plaques différentes; le bois étant mauvais conducteur n'affaiblit que très-peu l'action de la pile par la communication qu'il établit entre les extrémités. Cette dernière pile est un perfectionnement de l'appareil à couronne de tasse de Volta. On fait beaucoup usage dans ce moment d'une pile qui diffère un peu de la précédente, le liquide est contenu dans des verres. On la voit dans la figure 204. L'extrémité zinc est *z*; c'est une bande de zinc soudée à une bande de cuivre *c*. Cette bande de cuivre est large et enveloppe l'élément zinc (*z'*) de la seconde paire; on sent très-bien que cette enveloppe de cuivre ne touche pas le zinc; la séparation est établie par du liége. A l'élément (*z'*) de zinc est soudé une bande de cuivre (*c'*) qui va envelopper l'autre élément zinc de la troisième paire, et ainsi de suite. Cette nouvelle construction est attribuée à M. Wollaston.

Piles sèches (1).

365. Les piles dont nous venons de parler ont d'abord une assez grande puissance, mais leur destruction est rapide. On a cherché s'il ne serait pas possible d'avoir des piles qui, étant mises en action sans le secours des acides, pourraient se conserver pendant très-long-temps. M. De-

(1) MM. Hachette et Desormes avaient construit une pile sèche dès 1803. Le conducteur était une couche d'amidon. Les disques étaient semblables à ceux des piles à colonnes de Volta.

luc et M. Zamboni ont construit une pile sèche dont les disques sont de papier argenté (ou plutôt zinqué) sur une des faces, et recouverts d'oxide de manganèse sur l'autre. On réunit plusieurs milliers d'élémens; on forme deux colonnes verticales qu'on entoure de soufre fondu, afin de les isoler et de les préserver de l'humidité de l'air; on les établit à côté l'une de l'autre sur une feuille métallique; de cette manière les colonnes ne font qu'une même pile. On place ensuite un petit balancier isolé entre les deux colonnes. On le voit attiré et repoussé par chaque extrémité (*fig.* 205); on a ainsi un mouvement qui dure quelquefois plusieurs années. Cet instrument se détruit pourtant à la longue. On ne peut produire avec cette pile ni la décomposition de l'eau, ni les autres effets chimiques et physiques dont il sera question dans un des chapitres suivans.

Des piles secondaires.

366. Quand on réunit les extrémités d'une pile isolée par un conducteur imparfait, la décharge de cet instrument n'est pas instantanée; et, si l'on supprime la communication au bout de quelques minutes, chaque extrémité du conducteur est dans le même état que l'extrémité de la pile qu'elle a touchée. Cette pile produira la commotion, les décompositions chimiques, et en général tous les effets de la pile ordinaire, mais à un degré d'énergie beaucoup moindre que la pile dont elle a emprunté sa vertu. De plus, son action s'affaiblit promptement et disparaît après quelques instans.

Un ruban humide, un certain nombre de disques métalliques séparés par des disques de carton mouillé, et en

général tous les conducteurs imparfaits peuvent servir à former des piles secondaires. Ces piles ont été découvertes par Ritter. Cependant il faut remarquer, qu'avant ce physicien, Volta avait constaté qu'une bande de papier imbibée d'eau pure, mise en contact avec les extrémités d'une pile, de manière à la décharger, avait acquis à chacun de ses bouts, l'électricité de l'extrémité correspondante de la pile.

Effets de la pile.

367. Pour comprendre les effets de la pile, il faut avoir une idée nette de ce que c'est que courant électrique, et tension électrique.

La tension électrique s'observe lorsque les deux corps entre lesquels l'action électromotrice a lieu sont séparés l'un de l'autre par des corps non conducteurs dans tous les points de leur surface autres que ceux où cette action s'exerce.

Le courant électrique est produit quand les deux corps électromoteurs font partie d'un circuit de substances conductrices qui les font communiquer par des points différens de ceux entre lesquels l'action électromotrice se développe.

1°. *Effets physiques.*

368. Nous avons vu qu'une pile à colonne en communication avec le sol par sa base cuivre, est chargée complétement de fluide positif, et que l'intensité électrique est croissante depuis la base où elle est nulle jusqu'au sommet où elle atteint le maximum. On peut charger une bouteille de Leyde, un condensateur, en les

communication avec cette extrémité supérieure; mais il faut remarquer ici que l'intensité électrique étant faible, même au sommet, il est nécessaire d'employer des instrumens délicats, et d'établir parfaitement les contacts. M. Biot a reconnu qu'un vase en fer (1) rempli de mercure et placé sur le sommet de la pile, établit toujours le contact de la même manière. S'il s'agit d'un condensateur, par exemple, on fixe une tige en fer au plateau supérieur de cet instrument, et l'on fait plonger l'extrémité dans le mercure. Il est sous-entendu que le plateau inférieur communique avec le sol. Il faut ajouter qu'il est indispensable d'employer entre les deux disques du condensateur une lame de séparation très-mince, comme une couche de vernis, etc. Cette dernière précaution est commandée par la faiblesse de la tension électrique, au sommet d'une pile, même d'un grand nombre d'élémens.

Ce que nous disons ici d'une pile à colonne et du condensateur s'applique à une pile quelconque, à la bouteille de Leyde, et aux batteries.

Il résulte des expériences de M. Van Marum de Harlem, qu'une batterie au même degré de tension chargée par une pile ou par une machine électrique produit les mêmes effets; et que la tension, la charge du condensateur, ne dépendent que du nombre et non des dimensions des plaques. M. Biot s'est également occupé de ce sujet, et est arrivé à la même conséquence relativement à l'étendue des plaques. C'était d'ailleurs aussi l'opinion de Volta.

---

(1) Il serait plus exact d'établir la communication au moyen d'un fil de cuivre seulement.

On vérifie ce résultat en touchant différentes piles, dont les élémens sont en égal nombre, mais qui diffèrent par leurs dimensions avec un condensateur sensible ou avec un électroscope. Au reste, cela doit être, d'après la disposition de l'électricité sur deux lames en contact. Il doit s'en répandre d'autant plus, que le contact a plus de puissance; mais l'intensité sur un point donné, ou la tension, doit être tout-à-fait indépendante des dimensions des plaques.

Si $n\,e$ est la quantité d'électricité libre du sommet de la pile en communication avec le sol par le sommet opposé. Un condensateur dont le plateau supérieur sera égal et semblable à l'élément qu'il touche, prendra une charge exprimée par $f\,n\,e$, si f représente la force condensante de cet instrument. Il est visible que la pile reprendra au sol l'électricité qui lui est nécessaire pour se remettre dans son état primitif.

Si la pile est isolée, le calcul qui donne la charge est un peu plus compliqué (1).

---

(1) Si x est l'électricité de l'élément touché par le condensateur, F la force condensante de cet instrument, C sa capacité comparée à celle de l'élément touché prise pour unité, $F\,C\,x$ sera la charge qu'il prendra. Mais la progression de l'électricité distribuée étant toujours de même forme, la somme sera toujours $2\,n\,x - n^2\,e$, qui jointe à $F\,C\,x$, doit faire une somme totale nulle, puisque toute l'électricité décomposée est restée dans la pile. Ainsi l'on aura $2\,n\,x - n^2\,e + F\,C\,x = o$, d'où

$$x = \frac{n^2\,e}{2\,n + F\,C}. \quad (a)$$

Cette expression est la quantité de l'électricité libre sur l'élément touché; elle est d'autant plus faible, que le condensateur a plus de capa-

369. D'après la théorie de la pile, la décharge de cet instrument doit produire tous les effets mécaniques auxquels donnent nais ance la bouteille de Leyde et les batteries. En effet, si l'on réunit les deux extrémités d'une pile isolée ou non isolée, par des fils de fer, de zinc, d'étain, de plomb, de cuivre et même d'argent et d'or, les fils rougissent et entrent en combustion avec dégagement de plus ou moins de lumière (1).

Le savant professeur de Harlem a fait, sur ce point,

---

cité et une force condensante plus grande. La charge du condensateur devient $F\ C\ \frac{n^2 e}{2n + FC}$.

Si l'on applique le condensateur sur un élément distant de $m\ r$ rangs du sommet, on aura pour la quantité d'électricité libre de cet élément $x-(m-1)e$, et $CF\,[x-(m-1)e]$ pour la charge du condensateur; et pour l'équation de condition $CF\,[x-(m-1)e] + 2nx - n^2 e = o$; de là on déduira la valeur de x.

Tous les calculs que nous avons donnés sur la pile, ont été présentés dans le rapport fait, sur la pile de Volta, par une commission de l'Institut, composée de MM. Laplace, Hallé, Biot, etc.

Tous les calculs sont fondés sur la supposition que la différence entre les quantités d'électricité libre de deux plaques en contact, est indépendante de l'état de ces plaques.

Applications. Un condensateur dont la capacité est égale à celle d'un élément d'une pile de 48 paires, et dont la force condensante est égale à 20, est en communication avec l'élément zinc extrême de cette pile, on aura $x=33,882$, et la charge du condensateur sera 677,64.

Si la capacité du plateau collecteur-condensateur est sept fois celle d'un élément, on aura $x=12,255$, et la charge du condensateur 1715,70.

Pour résoudre cette question, il suffit de mettre dans l'équation (a), les valeurs des lettres n, C et F.

(1) Au moment où l'on approche deux fils, communiquant chacun avec une extrémité de la pile, on les voit s'attirer à une distance sensible.

conjointement avec Psaff de Kiel, une série d'expériences intéressantes, dans lesquelles il met bien en évidence l'avantage de l'étendue des plaques pour produire la fusion et la combustion des fils.

On voit bien que la puissance d'une pile pour donner la commotion ou produire la fusion des métaux, doit être proportionnelle à l'étendue des plaques, ou du moins doit croître avec leur étendue.

M. Children, par l'emploi d'une pile à larges disques, a augmenté beaucoup les effets obtenus par M. Van Marum. Chaque plaque de zinc avait six pieds en longueur et deux pieds huit pouces en largeur; chaque plaque de cuivre avait une surface double de celle de la plaque de zinc; cette pile était analogue à celle qui est représentée (*fig.* 204).

En excitant une pile de 21 paires par de l'eau contenant un vingtième de son poids d'acide nitrique et d'acide sulfurique, M. Children est parvenu à fondre même des fils de platine de 2 pouces $\frac{1}{4}$ de long, et de 2 lignes environ de diamètre.

370. Quand on réunit les extrémités d'une pile par les organes, on éprouve une commotion continue, qui se fait sentir dans la main, dans le bras, etc., selon le degré d'énergie de l'instrument. La commotion est continue, parce que la pile se recharge elle-même. Quand le nombre des paires ne surpasse pas cent, et que la surface de chaque élément n'est pas au-dessus de 4 pouces carrés, cette commotion est reçue sans le moindre danger, et même on est obligé de se mouiller les mains afin de rendre la communication plus parfaite. Mais il n'en serait plus de même si les plaques avaient des surfaces beaucoup plus considé-

sidérables; si elles avaient, par exemple, un pied de côté.

2°. *Effets chimiques de la pile.*

371. L'invention de la pile voltaïque a été la source des plus belles découvertes. C'est par le secours de cet ingénieux instrument que la nature des terres et des oxides a été dévoilée. Il n'est pas de substance composée dont une pile ne puisse désunir les élémens.

Nous indiquerons successivement la décomposition de l'eau, des oxides, des acides et des sels.

372. La première application qu'on ait faite de la pile à la chimie est due à MM. Carlisle et Nicholson. C'est celle de la décomposition de l'eau.

Pour répéter l'expérience, faites plonger les deux fils d'une pile en activité dans un verre d'eau ordinaire, à l'instant même vous verrez des bulles de gaz se dégager. L'oxygène partira du fil positif, et l'hydrogène du fil négatif. Le petit appareil suivant, en usage dans les cours, est fort commode pour cette expérience. Il est représenté dans la figure 206; c'est un entonnoir de verre dont la petite ouverture reçoit un bouchon, à travers lequel on a fait entrer deux tubes de verre: chaque tube sert d'enveloppe à un fil de platine; les fils de platine, les tubes, le bouchon, tout est scellé avec de la cire d'Espagne. Les deux fils sont tournés en crochet à l'extérieur, et s'élèvent parallèlement l'un à l'autre dans l'entonnoir. On remplit l'entonnoir d'eau, et l'on recouvre chaque fil d'une petite cloche remplie du même liquide. On fait communiquer chaque fil de platine par son crochet extérieur à une extrémité de la pile, et le dégagement de gaz commence aussi-

tôt; seulement il est bon d'ajouter à l'eau de l'entonnoir un peu d'acide sulfurique, afin d'augmenter sa propriété conductrice. Si l'on mesure le volume des gaz on trouvera deux fois autant d'hydrogène que d'oxygène; c'est là en effet le rapport de ces gaz dans l'eau. Il ne faut pas substituer aux fils de platine des fils de fer, ou d'autre métal oxidable, parce que l'oxygène se fixerait sur le métal, et l'on n'obtiendrait que du gaz hydrogène.

Il résulte des expériences de MM. Gay-Lussac et Thénard que le dégagement de gaz est presque nul, si l'entonnoir est rempli d'eau bouillie et pure, et qu'en général le dégagement est d'autant plus abondant, que la quantité d'acide ou de sel que ce liquide renferme, est plus considérable.

373. La seconde application importante a été faite par M. Cruikshanks. Ce savant ayant répété l'expérience de Carlisle et Nicholson, en mêlant à l'eau de l'acétate de plomb, du sulfate de cuivre, vit le fil négatif se couvrir de petites aiguilles métalliques. L'oxygène de l'oxide se portait à l'extrémité positive avec l'acide qui tenait le métal en dissolution. L'eau de la dissolution était aussi décomposée.

Le courant de la pile désunit également les élémens des acides et des oxides libres.

L'acide sulfurique concentré, mis dans un tube recourbé (*fig.* 207), et soumis à l'action de la pile, laisse dégager son oxygène à l'extrémité positive, tandis que son soufre se dépose à l'extrémité négative.

Si l'on répète la même expérience avec un hydracide, l'hydrogène se dégagera toujours à l'extrémité négative, tandis que le corps acidifiant se rendra libre à l'extrémité positive. Ainsi l'acide hydriodique est décomposé aussitôt

qu'il est soumis au courant voltaïque; l'acide hydrochlorique n'y résiste pas non plus bien long-temps. Le chlore avec sa couleur verte apparaît à l'extrémité positive, et l'hydrogène à l'extrémité négative.

374. La plus belle application, la plus féconde en résultats qu'on ait faite de la pile, est la décomposition des alcalis. Cette découverte, due à sir H. Davy, a singulièrement contribué à l'avancement de la chimie. Ce célèbre chimiste ayant fait agir la pile sur les alcalis (la potasse et la soude), vit l'oxygène se dégager au fil positif, et le métal se réunir en une substance brillante au fil négatif. Ces métaux décomposent l'air et l'eau à la température ordinaire, et même, le potassium (métal de la potasse), jeté dans l'eau, y brûle avec lumière; la chaleur qu'il produit détermine la combustion par l'air de l'hydrogène qui se dégage. C'est cette grande affinité pour l'oxygène qui faisait qu'on ne pouvait recueillir que des atômes de ces substances. On doit à M. le docteur Seebeck un moyen fort simple de les défendre du contact de l'air : il consiste à unir le potassium ou le sodium au mercure, à mesure qu'il est désoxidé. A cet effet, on coule un peu d'hydrate de potasse ou de soude, de manière à lui donner la forme d'un verre de montre. On le remplit de mercure, on le pose sur une plaque métallique; on fait communiquer le support de métal avec le fil positif, et l'on plonge dans le mercure le fil négatif. On a soin d'humecter l'hydrate, afin d'augmenter sa propriété conductrice. Il faut une pile assez énergique; elle doit contenir au moins cinquante paires de deux à trois pouces de côté. L'oxygène de l'hydrate et celui de l'eau se rendent au fil positif, l'hydrogène se dégage au fil négatif, le métal se porte au même fil.

et s'unit au mercure. Si l'on veut seulement rendre la décomposition sensible, on jette au bout de 5 à 6 minutes le mercure dans un verre d'eau, et l'on voit à l'instant l'hydrogène de ce dernier liquide se dégager. Au contraire veut-on recueillir le métal, on donne à l'expérience plus de durée; on jette de temps à autre l'amalgame dans l'huile de naphte, et l'on renouvelle le mercure. Quand on s'est ainsi procuré une suffisante quantité d'amalgame, on le distille dans une petite cornue de verre; l'huile et le mercure se volatilisent; le potassium ou le sodium reste dans la cornue.

Des expériences analogues ont démontré à M. Davy et à M. Seebeck la composition des autres alcalis.

On n'est parvenu, même avec les piles les plus puissantes, qu'à séparer de très-petites quantités de métal. MM. Gay-Lussac et Thénard, après la découverte de M. Davy, ont obtenu par le secours seul des affinités chimiques, le potassium et le sodium en quantité assez considérable pour qu'on puisse les faire servir aux analyses chimiques (voyez *Recherches physico-chimiques*).

Avant la décomposition des alcalis, MM. Berzélius et Hizinger (*Ann. Ch.*, 51) avaient fait servir la pile à la séparation des élémens des acides, des sels et même des oxides métalliques. Ces savans chimistes suédois avaient remarqué que l'oxygène et les acides se portent au fil positif, tandis que les alcalis et les métaux se portent au fil négatif.

375. Une particularité bien remarquable c'est le transport des substances soumises à l'action de la pile. Ainsi, qu'on remplisse un syphon de sulfate de potasse et un second syphon d'eau pure, qu'on joigne ces deux syphons par un peu de coton mouillé (*fig.* 208), au bout de quelque

temps le syphon qui communique au fil positif, ne renferme que de l'acide sulfurique, et la potasse a passé complétement du côté du fil négatif.

On peut rendre encore l'expérience plus curieuse. Au lieu de deux syphons, qu'on en emploie trois, et qu'on mette du sulfate de potasse dans celui du milieu, et de l'eau distillée dans les deux autres; le même résultat sera obtenu après quelque temps, et tout le sel sera décomposé.

Les réactifs les plus sensibles ne sont pas affectés par le passage des substances soumises au courant électrique; ainsi, l'acide sulfurique traverse la teinture de tournesol sans la rougir; il traverse également l'ammoniaque, la potasse, sans s'y unir.

376. Les phénomènes chimiques de la pile sont encore enveloppés de quelque obscurité. L'explication qu'on en donne le plus ordinairement est la suivante:

Quand on met les deux fils attachés aux extrémités d'une pile en contact avec un corps qui peut être décomposé par cet instrument, les molécules du corps se mettent dans un état opposé d'électricité, les unes sont chargées d'électricité négative, les autres d'électricité positive. Les premières se portent au fil positif, les autres au fil négatif.

Dans l'eau, par exemple, toutes les molécules d'oxygène placées sur le courant électrique prennent l'électricité négative, et les molécules d'hydrogène prennent l'électricité positive (*fig.* 209). La dernière molécule d'oxygène se dégage à l'état de gaz; il en est de même de la dernière molécule d'hydrogène. Les molécules intermédiaires se réunissent pour former de l'eau. Cet effet se répète pendant tout le temps que le courant voltaïque est maintenu.

Il semblerait que, dans cette explication, l'effet de la

pile devrait être d'autant plus grand, que la force répulsive aux extrémités des fils serait plus considérable. Ainsi, la décomposition de l'eau pure devrait être plus facile que celle du même liquide rendu plus conducteur par la présence d'un acide, ce qui est contraire à l'expérience. Il faut en conclure que le passage du courant électrique à travers les molécules d'un composé favorise la séparation de ces élémens (1).

Cette explication ne paraissant pas susceptible de rendre raison de tous les phénomènes, M. Ampère en a proposé une autre que voici :

Pour la concevoir, il faut d'abord admettre que les particules des corps sont dans un état permanent d'électricité, état qui est positif pour les unes et négatif pour les autres. Les alcalis et l'hydrogène sont dans le premier cas; les acides et l'oxygène, dans le second.

Si ces particules ne manifestent aucun signe d'électricité, c'est parce que celle qui leur est propre doit, d'après les lois ordinaires des actions électriques, décomposer le fluide neutre qui remplit l'espace autour d'elles, repousser l'électricité de même nom, attirer le fluide de nature opposée, et former ainsi de ce dernier une petite atmosphère électrique autour de leurs particules, telle que son action à distance, se trouvant égale et opposée à celle de l'électricité propre à ces particules, cette action s'oppose à toute décomposition ultérieure du fluide neutre environnant (n° 330). Chaque particule est alors dans le cas d'une bouteille de Leyde dont les parois seraient très-minces.

---

(1) Voyez *Ann. ch. ph.*, tom. 28, un Mémoire de M. A. de Larive.

Supposons maintenant qu'on mette en contact des particules d'oxygène et des particules d'hydrogène, et que, par l'élévation de température ou de toute autre manière, on fasse communiquer l'électricité positive libre qui entoure les particules d'oxygène avec l'électricité négative libre qui entoure les particules d'hydrogène, ces deux électricités se réunissant formeront du fluide neutre; et les électricités propres de l'hydrogène et de l'oxygène cessant d'être dissimulées, les particules de ces corps se combineront pour former de l'eau. Il est évident que chaque particule d'eau se conduira comme n'ayant aucune électricité, si les quantités de fluide des particules d'oxygène et d'hydrogène sont dans un rapport convenable pour qu'elles se dissimulent complètement, et il n'y aura aucune tendance dans la particule d'eau pour décomposer le fluide neutre environnant.

Dans les circonstances où le corps électro-négatif est en excès, le composé sera électro-négatif. C'est le cas des acides; leurs particules sont entourées d'une atmosphère positive; les alcalis, au contraire, renferment un excès de particules électro-positives et sont électro-positifs, et les atmosphères de leurs particules sont négatives. Les alcalis et les acides pourront, par leur réunion, donner des sels neutres, électro-négatifs ou électro-positifs.

Dans cette hypothèse, on voit bien pourquoi, au moment de la combinaison d'un acide et d'un alcali, le courant électrique dans le fil conducteur se manifeste de l'acide à l'alcali; ce sont les électricités libres des particules de l'acide et de l'alcali, qui se portent dans ce fil pour se réunir (n° 385).

On voit avec la même facilité pourquoi, dans les décom-

positions chimiques, les particules d'oxygène et celles des corps électro-négatifs sont portées à l'extrémité positive de la pile, tandis que celles de l'hydrogène et des corps électro-positifs sont attirées par l'extrémité négative. On comprend encore comment le courant électrique déterminé par le contact d'un alcali et d'un acide, est différent de celui qui se manifeste dans leur combinaison.

377. L'air joue-t-il un rôle dans les phénomènes de la pile? Comme l'expérience fait voir que la pile ne produit des effets énergiques, qu'autant qu'elle est excitée par des acides puissans, tels que l'acide nitrique, etc., qui déterminent l'oxidation des plaques, on a été conduit à penser que l'absorption de l'oxygène de l'air par les plaques était une des causes de l'action électrométrice qu'elles exercent. MM. Biot et Frédéric Cuvier ont constaté que quand on place une pile chargée avec un sel, sous une cloche de verre, l'absorption de l'oxygène a en effet lieu, mais cela ne prouve pas que cette absorption soit la cause des phénomènes produits par la pile.

Comme la décomposition de l'eau, opérée par la pile, ne paraît pas beaucoup ralentie quand on la place sous une cloche où l'on raréfie l'air, la pile paraît avoir en elle même une force indépendante du concours de l'oxygène, conséquence tout-à-fait d'accord avec les expériences fondamentales qui ont conduit à la découverte de cet instrument. L'influence de l'oxygène est surtout importante, quand le conducteur humide est l'eau ou une dissolution saline, parce que, dans ce cas, l'énergie de la pile est faible. Mais si l'on emploie pour conducteur humide un acide puissant, le concours de l'oxygène de l'air

n'apporte plus qu'une augmentation bien légère dans l'énergie de la pile.

On avait au reste observé, dès l'origine du galvanisme, que les élémens d'une pile abandonnée à elle-même étaient fortement oxidés en très-peu de temps.

Comment l'oxygène de l'air agit-il par son contact avec la pile? C'est ce qui n'est pas encore parfaitement connu.

3°. *Effets dynamiques.*

378. Deux fils conducteurs s'attirent ou se repoussent selon que les courans qui les parcourent vont dans le même sens ou en sens opposé. L'action d'un fil conducteur aimante un fil d'acier, etc. (*voyez* les phénomènes électro-dynamiques).

Phénomènes relatifs à la pile.

379. Pour que le contact de deux substances développe de l'électricité, il suffit qu'il y ait entre elles la plus légère différence. Par exemple, du plomb pur mis sur du plomb frotté contre un autre métal, dégage assez d'électricité pour exciter des convulsions dans une grenouille écorchée. (*Hallé.*)

Il n'est pas non plus nécessaire que les lames en contact aient de bien grandes dimensions. Un fil de zinc et une pièce de monnaie d'argent décomposent l'eau, les sels. Avec une seule paire (*fig.* 210), assez petite pour tenir dans un dé à coudre, M. Wollaston a fait rougir des fils de platine. Il est vrai que pour que cette dernière expérience réussisse, il est nécessaire d'activer l'action galvanique par l'acide nitrique.

L'action galvanique se développe même dans un circuit

fermé. Plonge-t-on dans de l'acide sulfurique étendu un semblable circuit formé par le cuivre et le zinc (*fig.* 211), l'hydrogène de l'eau se porte vers le cuivre, et l'oxygène se combine avec le zinc. Ici les deux électricités, se réunissant à travers le liquide, en déterminent la décomposition. Cette expérience est de M. Gay-Lussac.

380. Sir H. Davy a rendu récemment (1824) un nouveau service à la science, en appliquant ingénieusement les principes de l'électricité du contact. Ce célèbre chimiste a trouvé le moyen de soustraire les feuilles de cuivre du doublage des vaisseaux, à l'action corrosive de l'eau de la mer. On sait que cette action est telle, que souvent un voyage de quelques mois nécessite des réparations considérables. Le cuivre, métal positif, s'empare d'une partie du chlore des chlorures de l'eau de mer, et l'oxygène de l'air s'unit aux métaux (sodium, magnésium, des chlorures). Le cuivre se saisit du chlore parce qu'il est positif; mais si on le rendait négatif, en le mettant en contact avec un métal plus positif, son action sur l'eau de la mer devrait être nulle, puisque la destruction a particulièrement lieu par suite de sa combinaison avec le chlore, corps essentiellement négatif. C'est ce que sir H. Davy a fait en appliquant sur les feuilles de cuivre des lames de zinc, de fer ou de fonte.

Quel rapport doit-il exister entre la surface du métal protecteur et la surface du cuivre? Ce rapport peut varier de $\frac{1}{40}$ à $\frac{1}{150}$. Ce dernier est cependant préférable : le cuivre devient trop négatif par le contact d'une lame de zinc ou de fer de $\frac{1}{40}$ de sa surface; il attire les oxides (magnésie, chaux, etc.), se couvre d'une croûte blanche, de végétations, etc. Il est clair que le métal protecteur doit être re-

nouvelé de temps à autre. On a mis en France, en Angleterre, etc., cette belle application à profit (1).

L'explication de plusieurs faits connus se trouve naturellement dans ce qui précède. Par exemple, on sait que le fer blanc, qui n'est pas recouvert d'étain sur toute sa surface, est bientôt percé par suite de l'oxidation du fer. Ce dernier métal étant positif par rapport à l'étain, s'empare de l'oxygène de l'air, de l'eau, etc.

Des Substances qui ont, par rapport à l'électricité galvanique, une faculté conductrice particulière.

381. M. Erman, de l'Académie de Berlin, a fait sur la conductibilité de certaines substances des expériences dont les résultats sont très-curieux.

Si l'on met en contact avec l'une quelconque des extrémités d'une pile isolée, un électroscope très-sensible, et que, les feuilles d'or de cet instrument ayant acquis le degré de divergence qui répond à la tension de la pile, on joigne le réservoir commun et l'extrémité opposée par un fil métallique coupé en deux parties que réunit la flamme d'une lampe à alcool, à l'instant l'électroscope acquiert un surcroît de divergence; ce qui prouve que la communication est établie.

Si l'on attache aux deux extrémités d'une pile isolée deux fils métalliques, et qu'on les approche jusqu'à ce qu'ils entrent dans la flamme d'une lampe à alcool, la

(1) M. Davy observe dans son Mémoire, *Ann. ch. ph.*, tom. 29, qu'une dissolution concentrée de sel marin attaque moins le cuivre que ne le fait une dissolution étendue; différence qu'il attribue à la présence d'une plus grande [illegible]é d'air dans cette dernière.

tension reste la même aux deux extrémités, comme on le voit par les électroscopes qu'on y a placés. Tant que l'isolement de la pile a lieu, les électroscopes divergent à peu près comme dans le cas où les fils n'existeraient pas. Mais plonge-t-on dans la flamme un fil métallique en communication avec le sol, à l'instant l'extrémité positive est déchargée, et la divergence de l'électroscope placée à l'extrémité négative est augmentée.

Il résulte de là que lorsque la flamme d'alcool ne communique qu'avec une extrémité soit négative soit positive, et avec le sol, elle est conductrice de l'électricité. Si, étant isolée, elle est en communication avec les deux extrémités à la fois, elle agit comme corps non conducteur. Enfin, si elle est en communication avec le sol, en même temps qu'elle réunit les deux extrémités, elle fait fonction de corps isolant relativement au fluide négatif, et celle de corps conducteur relativement au fluide positif.

Un prisme de savon desséché se comporte de la même manière, avec cette différence qu'il décharge l'extrémité négative.

M. Erman a reconnu des propriétés analogues dans la flamme de phosphore, la gélatine desséchée, l'ivoire, etc.

382. Il serait très-important de connaître l'état réciproque dans lequel les différens corps peuvent se mettre par le contact. Les expériences ne sont pas assez multipliées pour qu'on puisse donner une table complète. En attendant nous rapporterons celle que nous trouvons dans l'ouvrage de M. Berzélius.

Dans cette table, chaque corps est positif à l'égard de ceux qui le précèdent, et négatif à l'égard de ceux qui le suivent.

Or	Cobalt
Iridium	Bismuth
Rhodium	Étain
Platine	Plomb
Palladium	Fer
Mercure	Cadmium
Argent	Zinc
Cuivre	Manganèse
Nickel	

Cette table est déduite de considérations chimiques; nous voyons qu'elle est d'accord avec les expériences de Volta sur quelques métaux.

M. Lehot s'est occupé de ce sujet, à une époque où l'histoire de la pile était peu avancée. Il a trouvé par des expériences fort délicates l'ordre suivant : Argent, cuivre, bismuth, mercure, étain, plomb, zinc. (*An. ch.*, t. 38.) Le multiplicateur pourrait servir à former une table exacte.

Expériences thermo-électriques.

383. Seebeck, membre de l'Académie de Berlin, a découvert qu'on peut établir un courant électrique dans les métaux sans l'interposition d'aucun liquide. L'expérience est fort simple. Soudez deux arcs de métaux différens, par exemple, de cuivre et de bismuth, de manière à former un cercle fermé. La forme de cercle n'est pas indispensable; il suffit que les deux métaux forment ensemble un circuit, c'est-à-dire, un anneau continu d'une figure quelconque. Pour établir le courant électrique, chauffez l'anneau à l'une des soudures, l'électricité positive dans la partie non chauffée se dirigera du cuivre vers le bismuth (*fig.* 212).

L'existence de ces courans ne peut être constatée que

par le secours de l'aiguille aimantée, dont il sera question plus bas.

Il résulte des recherches de MM. Fourier et OErsted, que les effets thermo-électriques peuvent être augmentés par la répétition alternative des barreaux de diverses matières.

On rend cet accroissement sensible par un hexagone composé de trois barreaux de bismuth, et de trois d'antimoine, soudés alternativement ensemble; la longueur de ces barreaux étant de 12 centimètres, leur largeur de 15 millimètres et leur épaisseur de 4 millimètres.

On donne à l'un des côtés de l'hexagone, la direction de l'aiguille aimantée; on place une boussole aussi près que possible sous le côté, et l'on chauffe d'abord l'une des soudures, à l'aide de la flamme d'une bougie. On observe l'effet sur l'aiguille; en chauffant deux soudures qui ne soient pas voisines, la déviation de l'aiguille augmente : lorsqu'enfin on élève la température de trois soudures alternatives, on parvient à un effet plus grand encore. Si l'on refroidit avec de la glace les soudures non chauffées, on porte la déviation de l'aiguille jusqu'à 60°.

On peut se convaincre, en portant le nombre des couples à 22, que chaque élément contribue à l'effet total.

Une particularité très-remarquable dans ces recherches, c'est que l'effet devient plus faible à mesure que la longueur des élémens augmente; en sorte que l'effet d'un circuit ne change pas lorsque la longueur de la circonférence augmente dans la même proportion que le nombre de ses élémens.

Il suit de là que, pour former des circuits complexes, capables de produire un grand effet sur l'aiguille ai-

mantée, on sera obligé de se servir d'élémens très-courts.

Il est encore digne de remarque, que l'appareil formé de 22 couples, capable de donner de grands effets électro-magnétiques, ne produit ni action chimique, ni ignition sensible. (*Ann. ch. et ph.*, 1823.)

On est parvenu à exciter des courans électriques dans un seul métal. Ainsi, un fil d'acier circulaire chauffé inégalement, fait mouvoir l'aiguille aimantée.

En général, il suffit de la plus légère différence entre des particules métalliques en contact, pour qu'elles se constituent dans des états électriques opposés, et pour qu'elles déterminent conséquemment un courant, si on les réunit.

Électricité développée par la pression.

384. La physique doit à M. Libes une des premières expériences qui aient rendu manifeste le développement de l'électricité par la pression. Cette expérience consiste à prendre un disque de métal qu'on tient par un manche isolant, et à le presser sur un taffetas gommé. Le taffetas acquiert l'électricité positive, et le disque de métal l'électricité négative; l'effet est d'autant plus marqué, que la pression est plus forte. Au contraire, si l'on passe le métal avec frottement sur le taffetas, c'est le métal qui prend l'électricité positive, et le taffetas l'électricité négative.

M. Haüy a reconnu que beaucoup de minéraux sont susceptibles d'acquérir la vertu électrique par la seule pression : par exemple, un rhomboïde de spath d'Islande (carbonate de chaux pur), pressé entre les doigts sur deux arêtes opposées, devient électrique au point d'exercer sur le pendule de moelle [illegible] eau une attraction très-sensi-

ble. Ce cristal est celui que M. Haüy considère comme le plus propre à devenir électrique à l'aide de la pression.

En général, les minéraux qui s'électrisent le plus facilement par la pression, ont un certain degré de transparence, et se réduisent par la division mécanique en lames minces.

Dans ce mode de développement d'électricité, comme dans tous les autres, chaque corps prend une électricité particulière. Il est évident que si l'on veut soumettre à l'épreuve de la pression, un métal, ou toute autre substance conductrice, il faut la tenir par un manche isolant (*fig.* 213).

Si l'un des deux corps conducteurs communique avec le sol, il perd son électricité; l'autre corps acquiert toujours la même électricité que lorsque le corps sur lequel on le pressait, était isolé.

Le liége, les fruits, les peaux, les minéraux, la houille, le bitume, les métaux, et en général tous les corps, se mettent dans des états opposés d'électricité par la pression.

Ces derniers résultats sont tirés du mémoire de M. Becquerel (*Ann. ch. et phy.*, t. 22), qui a repris les expériences de M. Haüy, et les a beaucoup multipliées.

De l'Électricité développée dans les phénomènes chimiques.

385. Les premières expériences sur le développement de l'électricité dans les phénomènes chimiques, sont généralement attribuées à MM. Lavoisier et Laplace. Ces illustres savans observèrent qu'en faisant agir plusieurs

kilogrammes d'acide sulfurique sur de la limaille de fer, il se développait assez d'électricité pour charger un condensateur, au point de donner des étincelles.

M. Avogadro, en Italie, a reconnu qu'on peut établir un courant électrique dans un seul métal, par l'action d'un acide; il suffit pour cela de ne pas plonger en même temps dans cet acide les deux extrémités du métal. L'expérience réussit surtout très-bien avec le zinc et l'acide sulfurique ou hydrochlorique, étendu d'eau. (Année 1821.)

Sir H. Davy a fait, en 1807, de nombreuses expériences sur l'électricité développée dans le contact des corps et dans les actions chimiques. Il en résulte que certaines combinaisons, et surtout celles qui se font avec un grand dégagement de chaleur, développent de l'électricité.

La découverte du multiplicateur de Schweigger, instrument capable de rendre sensibles les plus petits développemens d'électricité, et que nous ferons connaître par la suite, a fourni à M. Becquerel un secours qui avait manqué aux savans que nous venons de citer. M. Becquerel a fait avec beaucoup de soin l'étude d'un grand nombre de combinaisons chimiques, au moment même de leur formation. Il paraît bien établi maintenant que dans la combinaison d'un acide ou d'un oxide, avec un alcali, il y a développement d'électricité.

Pour faire ces expériences d'une manière commode, on prend un multiplicateur dont le fil est en platine; à l'une des extrémités, on fixe une petite cuiller aussi en platine, destinée à recevoir l'acide; à l'autre extrémité est une pince du même métal, entre les branches de laquelle on place le corps qui doit agir sur l'acide.

Si l'épreuve est faite avec un acide et un alcali, il s'é-

tablit dans le fil du multiplicateur un courant dans lequel l'électricité positive est portée de l'acide à l'alcali. (*Voyez* précédemment les effets chimiques de la pile.)

M. Oersted avait aussi trouvé, en se servant d'une aiguille aimantée, qu'il se produit un courant électrique au moment de l'action d'un acide sur un métal.

M. Pouillet vient aussi de constater que dans la combinaison du carbone avec l'oxygène de l'air, il y a un développement faible d'électricité.

De l'Électricité développée par la chaleur (1).

386. Certains minéraux acquièrent, à l'aide de la chaleur, la vertu électrique. La distribution de l'électricité dans un minéral ainsi électrisé, offre quelque ressemblance avec la distribution du magnétisme dans les aimans.

Chacun de ces minéraux a deux points, dont l'un est le siége de l'électricité négative, l'autre celui de l'électricité positive. Ces deux points, appelés *pôles*, sont toujours situés dans deux parties opposées du minéral.

Nous indiquerons la tourmaline comme la substance la plus propre à constater le développement de l'électricité par la chaleur. Si, après avoir fixé un prisme de tourmaline à une pince, on le présente à la chaleur d'une bougie, l'électricité naturelle de la substance est décomposée; de manière que l'électricité positive se porte vers un sommet de l'axe, et l'électricité négative vers le sommet opposé.

387. L'effet ne croît pas avec la température. Au contraire, si l'on élevait trop la température, les pôles seraient

(1) Il ne faut pas confondre les phénomènes dont il va être question avec les phénomènes thermo-électriques.

intervertis. Un refroidissement de 20 degrés au-dessous de zéro, donne aussi des pôles à la tourmaline.

La température à laquelle répond l'état neutre varie suivant les saisons; elle s'élève ou s'abaisse à mesure que la chaleur de l'atmosphère augmente ou diminue.

Dans tous les cas, cette substance reprend son état naturel par son retour à la température primitive.

388. Pour reconnaître les deux pôles d'une tourmaline électrisée, on lui présente un très-petit pendule non électrisé; il est attiré par les deux bouts. Le milieu du minéral est dans l'état naturel, aussi est-il sans action sur le pendule. Si d'avance on donne au pendule une électricité connue, il sera repoussé par un pôle, et attiré par l'autre.

Deux tourmalines électrisées doivent s'attirer par les deux pôles de nom différent, et se repousser par les pôles de même nom. L'appareil dont on se sert à cet effet se compose d'un support en cuivre terminé par une pointe d'acier très-aiguë, et d'une lame du même métal, relevée en équerre à échancrures. Cette lame est percée dans son milieu d'une cavité circulaire destinée à recevoir une petite chape d'agathe. L'une des deux tourmalines est placée sur cette lame : on présente alternativement à chacun de ses pôles, les pôles d'une autre tourmaline qu'on tient à l'aide d'une pince, et l'on vérifie ainsi l'énoncé de la proposition (*fig.* 214).

Ces expériences réussissent très-bien, même dans les temps les plus humides, à raison de peu de conductibilité de la tourmaline.

389. Si l'on casse une tourmaline électrisée, chaque fragment, quelque petit qu'il soit, a deux pôles électriques comme la tourmaline entière (Canton). Ce résultat paraît

singulier, si le fragment appartient à une partie de la pierre qui, avant la fracture, n'était chargée que d'une seule espèce d'électricité libre. On résout cette difficulté en considérant chaque molécule intégrante d'une tourmaline, comme étant elle-même une petite tourmaline pourvue de deux pôles; de sorte que la section ne pouvant avoir lieu qu'entre deux molécules, il faut nécessairement que le fragment ait deux pôles, comme la tourmaline entière.

390. On avait pensé que les cristaux susceptibles d'être électrisés par la chaleur, dérogeaient à la loi de symétrie que présentent ordinairement les substances cristallisées, et que les parties dans lesquelles résidaient les deux espèces d'électricité, quoique semblablement situées aux deux extrémités du cristal, différaient par leur configuration.

La magnésie boratée (borate de magnésie) offre bien cette corrélation entre la configuration extérieure et la vertu électrique. La forme de cette substance est un cube incomplet dans toutes ses arêtes, et modifié par des facettes qui répondent aux angles solides. Dans ce cristal, les électricités agissent suivant les directions des quatre axes, dont chacun passe par deux angles solides du cube. Dans la variété nommée *défective*, l'un des deux angles situés aux extrémités d'un même axe est intact; il est le siége de l'électricité négative; à l'autre angle remplacé par une facette, est l'électricité positive; de sorte qu'un petit minéral de deux millimètres de longueur, présente huit pôles électriques (*fig.* 215). (Haüy.)

La variété de tourmaline nommée *isogone* forme un prisme à neuf pans (*fig.* 216), terminé d'un côté par un sommet à six faces, et du côté opposé par un sommet à trois faces. L'expérience montre que dans le premier som

met réside l'électricité positive, et que le second est le siége de l'électricité négative.

391. Lemery (*Ac. des Sciences*, 1719) a le premier fait mention du développement de l'électricité par la chaleur. Canton, Brard, Haüy, l'ont successivement constaté dans différens minéraux. M. Brewster vient d'augmenter la liste des minéraux électriques par la chaleur; il a même reconnu un grand nombre de produits artificiels jouissant de la même propriété.

M. Brewster a employé pour électroscope la membrane interne et excessivement mince de l'*arundo phragmites*. (*Ann. ch. et ph.*, t. 28.)

Les principales substances électriques par la chaleur sont :

La Tourmaline;
La Topaze;
Le Spath calcaire;
Le Sulfate de barite;
Le Diamant;
L'Orpiment;
Le Quartz du Dauphiné;
Le Soufre natif;
L'Acide tartrique;
Le Tartrate de potasse et de soude;
Le Carbonate de potasse;
Le Sulfate de fer;
Le Sucre;
L'Acide citrique.

Ce qui précède montre que des substances dont la cristallisation est régulière, s'électrisent par la chaleur, et que conséquemment il n'existe aucune corrélation entre la forme et la vertu pyro-électrique, comme l'avaient fait croire les résultats fournis par les tourmalines, la magnésie boratée, etc.; il sera peut-être reconnu par la suite que tous les corps sont pyro-électriques.

392. Il résulte de ce qui précède que l'électricité doit se décomposer et se recomposer sans cesse à la surface et dans l'intérieur du globe, par le contact, la pression, le frottement, etc., des substances hétérogènes, par les variations de température, par les phénomènes chimiques, etc.

MAGNÉTISME.

393. On a donné le nom d'aimant à un minéral qui jouit de la propriété d'attirer le fer, le cobalt et le nickel. Ce minéral n'est autre chose que l'oxide intermédiaire de fer. Presque toutes les mines de cet oxide sont des aimans naturels.

Les trois métaux que nous venons de citer sont susceptibles de devenir des aimans artificiels. Cette propriété est-elle générale, ou est-elle le partage de ces trois corps? C'est ce que nous discuterons à la fin du magnétisme.

Propriétés générales des aimans.

394. 1°. Quand on roule un aimant dans de la limaille de fer et qu'on l'en retire ensuite, on voit que la limaille s'est attachée inégalement aux diverses parties de sa surface. On donne le nom de pôles aux deux points opposés sur lesquels la limaille s'est fixée en plus grande abondance (*fig.* 217).

2°. L'action magnétique s'exerce à distance. Suspendez à un fil flexible une petite aiguille de fer, et présentez-lui à distance un des pôles d'un aimant, elle sera attirée.

3°. La vertu magnétique se fait sentir indifféremment à travers toutes les substances conductrices ou non conductrices de l'électricité.

4°. L'isolement n'est pas nécessaire à la conservation

de la propriété magnétique. Le contact des substances étrangères ne fait rien perdre aux aimans.

5°. Un aimant abandonné à lui-même et libre de se mouvoir dans le plan horizontal, prend toujours, en Europe (1), une direction peu différente de celle du méridien. On appelle *déclinaison* l'angle que forme l'aiguille avec le méridien; la déclinaison est maintenant à Paris de 22°,20' environ. Une aiguille libre de se mouvoir dans tous les sens, prend une position inclinée à l'horizon dans le plan de l'aiguille horizontale. L'angle formé par la direction de l'aiguille et l'horizon s'appelle l'*inclinaison*. Il y a des lieux où l'inclinaison est nulle. (*Voyez* inclinaison.) La déclinaison n'est pas la même dans tous les lieux de la terre, et elle varie, dans le même lieu, avec le temps. (*Voyez* la fin du magnétisme.)

6°. Lorsque plusieurs aiguilles aimantées sont libres dans le plan horizontal, celles de leurs extrémités qui se tournent vers le même pôle du globe, doivent posséder le même magnétisme. On observe d'ailleurs que ce sont celles qui, dans l'aimantation, ont été en contact avec un même pôle. Approchées les unes des autres, elles se repoussent mutuellement. Au contraire, il y a attraction entre les extrémités qui ont reçu des magnétismes différens. De plus, lorsqu'on présente le pôle d'un aimant à une aiguille aimantée, libre dans le plan horizontal, celle-ci est sollicitée par les deux pôles, mais elle obéit à celui des deux dont elle est le plus rapprochée; de sorte que l'aiguille tourne vers le pôle de l'aimant le plus rapproché,

(1) Dans les régions polaires, l'aiguille aimantée prend une direction fort différente, et qu[illegible]ers l'est et l'ouest.

son pôle de nom contraire; et si, lorsqu'elle a pris une position fixe, on l'en détourne, elle y revient par une suite d'oscillations.

L'action du globe est tout-à-fait semblable à celle de l'aimant. Une aiguille aimantée revient toujours dans le méridien magnétique, et tourne le même pôle vers le même point du globe. On a tiré de là la dénomination des deux magnétismes. On a appelé *boréal*, celui qui domine dans la partie boréale du globe, et *austral* celui qui domine dans l'hémisphère austral; il faudra donc considérer l'extrémité d'un aimant, qui se dirige vers le sud, comme le pôle boréal, et l'extrémité qui se dirige vers le nord, comme le pôle austral.

7°. L'observation des phénomènes magnétiques montre que l'aimantation ne change pas les dimensions des corps qui en sont susceptibles. Une expérience de M. Gay-Lussac rend cette vérité palpable: un cylindre d'acier plein d'eau auquel ce savant académicien avait adapté un tube capillaire, en partie plein d'eau, conserva la même capacité après qu'avant l'aimantation. Nous avons déjà vu (n° 291), que l'électricité se comporte de la même manière.

8°. L'aimantation peut être déterminée à distance. Si l'on présente un barreau d'acier, suspendu par un fil flexible, à l'action d'un des pôles d'un aimant, il acquerra des pôles; cette expérience pourra se répéter un grand nombre de fois, sans que la vertu de l'aimant en soit diminuée.

9°. Un fil de fer pur reprend bientôt son état naturel; un fil d'acier, au contraire, et surtout lorsqu'il est fortement trempé, conserve sa vertu pendant un temps très-long. L'acier n'est autre chose que du fer uni à quelques

centièmes de charbon. L'oxigène, le soufre, le carbone, l'antimoine, etc., donnent au fer la propriété de conserver plus long-temps la vertu magnétique. Le nickel et surtout le cobalt peuvent conserver la vertu magnétique, même à l'état de pureté; cependant on l'augmente, dans ces métaux, de la même manière que dans le fer : savoir, par la trempe et par la combinaison avec les substances étrangères (1). Le fer, le nickel, le cobalt cessent d'être magnétiques, si on les combine avec un excès de substance étrangère.

10°. A une température élevée, à celle du rouge-blanc, par exemple, les barreaux aimantés perdent leurs pôles, c'est-à-dire qu'ils sont remis dans l'état naturel; il faut avoir soin de tenir l'aiguille dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, sans quoi elle s'aimanterait par l'influence du globe, en se refroidissant, et se conserverait aimantée après le refroidissement (Gilbert); et, ce qui est beaucoup plus singulier, à cette même température, le fer, le nickel et le cobalt deviennent insensibles à l'action des aimans (Barlow de Woolvich). Les expériences de Coulomb, de M. A. F. Kupfer, etc., montrent bien que l'intensité magnétique d'une aiguille aimantée diminue à mesure que sa température s'élève; de plus, que l'aimant, revenu à sa température primitive, ne reprend pas toute l'intensité magnétique qu'il avait avant d'être échauffé (*Ann. ch. et phy.*, t. 30, p. 113); mais la relation entre le changement de température et le changement d'intensité magnétique n'est pas encore bien connue.

---

(1) L'effet de la trempe n'est bien marqué que sur l'acier.

L'opinion adoptée par quelques marins, qu'un froid considérable détruit la vertu magnétique des boussoles, n'est pas fondée : une aiguille de boussole refroidie par l'évaporation du sulfure de carbone, oscille aussi bien et sensiblement autant qu'avant son refroidissement. (*Ann. ch. et phys.*, t. 21, p. 439.)

11°. Le choc, la torsion, la décharge électrique, le courant voltaïque, l'action de la terre, peuvent déterminer le développement des pôles dans les substances susceptibles d'aimantation.

Francklin et plusieurs physiciens aimantaient des fils d'acier par la décharge des batteries électriques; mais comme ils obtenaient des effets plus grands quand les fils étaient placés dans le méridien magnétique, que lorsqu'ils étaient placés dans une situation normale, ils attribuaient l'effet principal à l'action du globe. (Francklin, *Lett.*, 1773.) M. Arago, soit par un courant voltaïque continu, soit par un courant d'électricité ordinaire, interrompu, a donné à des aiguilles d'acier un degré de magnétisme bien déterminé; et ce qui prouve que l'aimantation n'est pas le résultat de l'influence du globe, c'est que deux aiguilles, l'une dans le méridien, l'autre dans un plan perpendiculaire, acquirent un degré de magnétisme sensiblement le même. (*Voyez* les phénomènes électro-dynamiques.) M. Ridolfi, long-temps après les expériences de M. Arago, est parvenu à produire l'aimantation de l'acier par un courant continu, mais passant par un fil tourné en hélice. (1). L'effet du choc sur un

(1) M. Savary, qui a récemment étudié ces phénomènes, a observé un fait fort remarquable, qui consiste en ce que des décharges électriques

barreau de fer ou d'acier, n'est bien sensible que lorsque le barreau se trouve placé dans le méridien magnétique; en sorte que le choc n'est que l'auxiliaire du globe. La torsion, comme moyen d'aimantation, a été peu étudiée.

Ce qui précède fait concevoir comment tous les outils des forgerons sont dans un état magnétique; comment la foudre intervertit les pôles des boussoles.

De la loi que suivent les actions magnétiques.

395. Avant d'établir la théorie des phénomènes magnétiques, nous exposerons la loi à laquelle sont soumises les forces qui déterminent ces phénomènes. Lambert (*Ac. de Berlin*, 1766) avait vu que l'hypothèse d'une intensité réciproque au carré de la distance, satisfesait à ses expériences et à celles de Muschenbroch. Coulomb a démontré cette loi par des expériences directes.

Coulomb est parvenu à ce résultat important par deux méthodes différentes. Pour mettre la première en pratique, il est nécessaire de connaître la manière dont le globe agit sur un aimant horizontal écarté du plan magnétique. A cet effet, on détermine d'abord la direction du plan magnétique, par le moyen d'une bonne aiguille aimantée. On attache au fil de suspension un étui (*fig.* 218), destiné à recevoir le barreau aimanté, et, afin de donner toujours à celui-ci la même position, la plaque horizontale de l'étui est revêtue en dedans d'une couche

---

graduellement croissantes en intensité déterminent successivement l'aimantation en sens i[illegible]e, et que des décharges intermédiaires ne produisent aucune ai[illegible]n. (*Ann. ch. et ph.*, janvier et février 1827.)

de cire d'Espagne, sur laquelle on prend l'empreinte du barreau aimanté.

On commence par placer dans l'étui une aiguille d'une matière non magnétique, et on tourne le micromètre jusqu'à ce qu'elle se tienne en repos vis-à-vis du zéro de la division : alors on dispose tout l'appareil de manière que, l'aiguille correspondant toujours à zéro, elle soit dans le plan magnétique ; et l'on y substitue le barreau aimanté. Celui qui a servi aux expériences de Coulomb, avait 24 pouces de longueur, et une ligne $\frac{1}{2}$ de diamètre. Ce physicien a ainsi trouvé les résultats suivans :

Torsion donnée au micromètre supérieur.	Angle de déviation où l'aiguille s'est arrêtée.	Nombre de degrés de torsion; force de torsion.
0	0°	0°
1	10 $\frac{1}{2}$	349 $\frac{1}{2}$
2	21 $\frac{1}{4}$	698 $\frac{3}{4}$
3	33	1047
4	46	1394
5	63 $\frac{1}{2}$	1756 $\frac{1}{2}$
5,5	85	1895

Ce tableau montre que la force directrice de la terre est proportionnelle aux sinus des angles d'écartement. Dans les petits angles qui sont égaux à leurs sinus, elle est proportionnelle à l'écart : ainsi les nombres 1047,698 $\frac{3}{4}$, 349 $\frac{1}{2}$, degrés de torsion, sont proportionnels à 33°, 21° $\frac{1}{4}$, et 10° $\frac{1}{2}$, angles d'écartement. (*Mém. de Coulomb, Acad. des Sciences.*)

Cela posé, il suffira de connaître le nombre des degrés de torsion correspondant à une distance déterminée, pour en déduire la valeur de la force directrice d'un degré. Coulomb trouva que deux cercles de torsion maintenaient le barreau dont nous avons indiqué les dimensions, à 20° de distance du méridien magnétique ; la

force de torsion était 720 — 20 ou 700, et puisque la force directrice, d'après les expériences rapportées ci-dessus, est proportionnelle à l'angle d'écartement quand il est petit, on aura $\frac{700}{20}$ ou 35° de torsion pour la valeur d'un degré d'écartement.

Coulomb plaça verticalement à côté du fil horizontal un autre fil de même dimension ; les deux fils se touchant par les pôles de même nom, il y eut répulsion. Le fil horizontal était le seul libre de se mouvoir. Voici les résultats des observations :

Angle de répulsion.	Force de torsion.
24°	0 cercle.
17	3
12	8

Dans la première expérience, le fil horizontal a été chassé à 24°, et s'y est arrêté. La force directrice du globe tendait à le ramener dans le méridien magnétique avec une force égale à 24 × 35 ou 840. En ajoutant à 840 la torsion du fil qui est ici 24, on a pour force répulsive totale des deux aimans 840 + 24 ou 864 degrés.

Dans la seconde, l'aiguille fesait un angle de 17 degrés avec le méridien magnétique; l'action du globe était égale à 17 × 35 degrés; la torsion imprimée au fil par le micromètre supérieur était égale à trois cercles ou 360 × 3; enfin la torsion du fil, produite en sens inverse de la première, et qui, conséquemment, doit lui être ajoutée, était 17° : en sorte que la force totale à laquelle la répulsion magnétique faisait équilibre était égale à 17 × 35 + 360 × 3 + 17 o[illegible] degrés. De même, dans la troisième

expérience, on trouverait pour la force totale 12 × 35 degrés, plus 8 cercles, plus 12 degrés ou 3312 degrés.

Dans ces trois expériences les arcs sont assez petits pour qu'on puisse les confondre avec leurs cordes. Les distances successives sont donc 24, 17, 12.

Les forces répulsives correspondantes sont 864, 1692, 3312. On voit que les forces répulsives sont sensiblement en raison inverse du carré des distances; par exemple, les deux expériences extrêmes donnent

$$24^2 : 12^2 :: 3312 : 864.$$

Des épreuves tout-à-fait semblables faites sur des pôles de nom contraire, ont fourni les mêmes résultats.

On ne doit se servir dans ces sortes de recherches, que d'aiguilles très-longues, afin de pouvoir négliger l'action des autres pôles. Le pôle de nom contraire de l'aiguille verticale contrarie par son attraction la répulsion de l'aiguille horizontale; mais, comme le plus grand arc de répulsion n'a été que de 24°, ce qui répondait à une distance de 5 pouces, et que conséquemment l'autre pôle s'est toujours trouvé au moins quatre fois plus éloigné, son action était donc seize fois moindre; d'ailleurs cette force était encore affaiblie par l'extrême obliquité, suivant laquelle elle s'exerçait. Il faut aussi avoir le soin de n'employer que de l'acier très-dur et très-fortement trempé, afin que l'action mutuelle des aimans ne puisse pas développer de nouveau magnétisme.

Nous citerons ici une expérience simple et propre à donner une idée de la manière dont s'exercent les attractions et les répulsions magnétiques; la voici : On prend deux barreaux aimantés d'égale force, et l'on présente chacun d'eux successivement à une clef. Elle est attirée,

quel que soit le pôle qu'on lui fasse toucher. Si maintenant, quand elle est soutenue par un pôle d'un des barreaux, on approche un pôle de nom contraire, elle tombe aussitôt.

Des procédés d'aimantation.

396. Nous ne considérons ces procédés que comme des résultats fournis par l'expérience.

Méthode de la simple touche.

397. Quoiqu'il suffise de mettre un fil de fer ou d'acier en contact avec un aimant pour qu'il acquière un certain degré de magnétisme, cependant on n'obtient par là qu'une aimantation assez faible, et il est nécessaire, pour avoir un degré de magnétisme un peu considérable, de faire glisser le barreau aimanté le long de celui auquel on veut communiquer ses propriétés. Cette opération a reçu le nom de touche; on répète la même opération toujours dans le même sens. Supposons que le pôle de l'aimant, en contact avec le barreau, [illegible] pôle austral; il attirera le magnétisme boréal, et repoussera le magnétisme austral (*fig.* 219).

La friction constamment dirigée dans le même sens détermine un état magnétique plus énergique que le simple contact. Mais, comme le pôle austral agit toujours par répulsion sur le magnétisme austral du barreau, il en résulte qu'il détruit par son mouvement une partie de l'effet produit; ainsi le magnétisme austral, qui était d'abord accumulé dans la partie *n* par suite de l'action du pôle *A* de l'aimant, se trouve chassé vers la partie opposée quand l'aimant est arrivé en *n*. Aussi cette méthode n'est-elle jamais mise en pratique quand on désire des barreaux

puissans. Par cette méthode, on n'obtiendrait pas des barreaux aimantés à saturation, c'est-à-dire portés dans cet état où la somme des forces attractives et répulsives du magnétisme libre, est égale à la résistance opposée par la force coërcitive de la substance à aimanter.

Méthode de la double touche.

398. L'inspection de la figure 220 montre que l'emploi de deux aimans est beaucoup plus avantageux; on les dispose verticalement, de manière que les pôles de nom contraire *A* et *B* se correspondent, et l'on fait glisser chaque aimant dans cette situation en le portant alternativement du milieu à l'extrémité; après un certain nombre de frictions, et lorsque les deux aimans se trouvent au milieu du barreau, on les enlève perpendiculairement à ce barreau. Le résultat de cette opération est de mettre chaque extrémité du barreau dans un magnétisme contraire à celui du pôle de l'aimant avec lequel elle a été en contact.

Il est aisé de voir que les deux aimans se secondent mutuellement; lorsque le pôle *A* de l'aimant *C* se trouve en *m* extrémité du barreau d'acier, il attire au point *m* le magnétisme boréal et repousse le magnétisme austral; l'aimant *D* à l'extrémité opposée *n* produit précisément un effet contraire.

Cette méthode a été imaginée par Michelli.

Æpinus pensait qu'on obtenait un avantage réel en inclinant chaque barreau sous un angle de 15 à 20 degrés (*fig.* 221). Mais il paraît que cette méthode d'Æpinus a l'inconvénient de faire naître des points *conséquens*, dont l'action contrarie l'action principale des pôles extrêmes.

On appelle points conséquens les pôles développés entre les deux pôles extrêmes. On reconnaît l'existence de ces points conséquens en présentant au barreau mal aimanté le pôle d'une petite aiguille aimantée.

Coulomb a remarqué qu'on faisait disparaître cet inconvénient, en recommençant toujours la friction à partir du milieu.

Par la méthode de la double touche, on se procure des barreaux aimantés très-puissans. Cependant il est possible de la rendre encore plus efficace.

Le physicien anglais Knight avait, dès 1745, imaginé un procédé dans lequel il employait aussi le concours de deux aimans pour développer le magnétisme dans des barreaux d'acier. Il réunissait deux barreaux fortement aimantés par les pôles de nom contraire; il posait ensuite sur ces gros aimans et dans le sens de leur longueur un petit barreau d'acier trempé au rouge cerise, de manière que son milieu répondît au point de jonction des deux aimans; alors il séparait ceux-ci, en les faisant glisser chacun de leur côté jusqu'aux extrémités du petit barreau.

Duhamel en France, Canton en Angleterre (années 1751 et 1752 *des phys. Transact.*), ajoutaient aux méthodes précédentes un nouveau degré de perfection. Leur méthode consiste à former un parallélogramme avec quatre barreaux, dont deux sont en fer doux, et deux autres en acier trempé; ce sont ces deux derniers qu'il s'agit d'aimanter. Les barreaux d'acier sont parallèles (*fig.* 222).

On aimante d'abord un des deux barreaux par la méthode du double contact; celui qui est marqué *C D*, par exemple, acquiert des pôles dont la position est indiquée

dans la figure. Après un certain nombre de frictions, on retourne le barreau, et l'on répète la même opération sur l'autre face. On fait des frictions pareilles successivement sur les deux faces du barreau *H K*, en observant de renverser les aimans puisque les pôles du barreau *H K* sont en sens contraire de ceux du barreau *C D*.

Il est visible que l'effet des barreaux de fer doux, dont le magnétisme se développe par le seul contact des aimans, est de maintenir dans les barreaux d'acier soumis à l'expérience, les deux fluides aux extrémités.

On donne encore aux barreaux une autre disposition (*fig.* 223). Le barreau destiné à être aimanté repose sur les deux barreaux de fer doux.

Il serait aussi avantageux d'employer pour barreaux auxiliaires, des barreaux déjà aimantés. Dans ce cas, il est évident qu'il faudrait les placer d'avance dans des positions respectives analogues à celles que représente la figure où les pôles de nom contraire sont en contact. Les barreaux d'acier, de nickel, de cobalt, aimantés par l'un ou l'autre de ces procédés, sont ce qu'on appelle des aimans artificiels. On réunit souvent plusieurs barreaux en un seul faisceau (*fig.* 224), en mettant ensemble les pôles de même nom; quelquefois on donne à ces aimans isolés ou réunis en faisceau la forme d'un fer à cheval (*fig.* 225). Le barreau qui occupe le milieu d'un faisceau rectiligne ou courbe dépasse les autres barreaux de quelques lignes.

Des armatures.

399. Il est assez rare de trouver des aimans qui, au sortir du sein de la terre, manifestent un magnétisme énergique.

L'expérience a appris que la vertu magnétique des aimans se conserve bien, et peut même s'accroître quand on les enveloppe de limaille de fer. Ce résultat a fait naître l'heureuse idée des armatures. On nomme ainsi des lames de fer doux qu'on applique sur les faces de l'aimant, et qui, devenant elles-mêmes magnétiques par son influence, augmentent avec le temps son énergie. La figure 226 représente un aimant avec ses armatures. Chaque armature, *a c d*, a la forme d'une équerre.

Soient *A* et *B* les pôles de l'aimant; chacun de ces pôles agit sur la lame qui lui est adjacente, de manière à attirer le fluide de nom contraire, et à repousser dans le pied *d* de l'armature le fluide de même nom. Il en résulte que chaque pied acquiert le magnétisme du pôle que l'armature touche. D'une autre part, le fluide de l'armature agit à son tour sur l'aimant. C'est de cette combinaison d'actions réciproques, que dépend la propriété que l'armature a d'augmenter la puissance de l'aimant. L'épaisseur à donner aux armatures n'est pas indifférente. Les dimensions convenables ne se trouvent guère que par des essais réitérés.

La même figure représente une lame *p r* avec un anneau destiné à supporter des poids. On charge aussi les aimans artificiels; l'expérience apprend que les aimans artificiels, de même que les aimans naturels, étant ainsi chargés, acquièrent une plus grande puissance.

Il a encore été reconnu que les petits aimans artificiels peuvent supporter des poids proportionnellement plus considérables. Ainsi des aimans que Coulomb avait faits avec soin, et qui pesaient environ vingt livres, ne pouvaient soutenir que cent livres, c'est-à-dire, cinq fois leur

poids; tandis que, d'après Ingen-Houz, les petits aimans portent jusqu'à cent fois leur propre poids.

Distribution du magnétisme.

400. Lorsqu'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on trouve qu'elle s'est attachée aux deux extrémités de l'aimant en quantité considérable, et au milieu en très-petite quantité (*fig.* 227). On pourrait donc connaître, d'une manière approximative, la distribution du magnétisme dans un aimant, par le poids de la limaille de fer attachée à chacun de ses points.

On se fait encore une idée de la distribution du magnétisme dans un barreau aimanté, en présentant à ses différens points une aiguille horizontale; on voit qu'elle est particulièrement agitée lorsqu'elle se trouve en présence des points voisins des extrémités.

La méthode employée par Coulomb pour la même recherche est tout-à-fait simple. Pour mettre cette méthode en pratique, on dispose d'abord la balance de manière qu'une aiguille aimantée se tienne dans le méridien magnétique, le fil n'ayant subi aucune torsion. Sur la direction du même plan on place une règle de deux millimètres d'épaisseur, et de telle manière que l'aiguille vienne s'y appliquer; à côté de cette règle on fixe un barreau aimanté; on remplace l'aiguille horizontale, non magnétique, par un petit barreau aimanté : les deux barreaux sont placés de manière que les pôles de même nom se trouvent en regard; le barreau horizontal est d'abord chassé à une certaine distance, mais on le ramène en contact avec la règle par une torsion convenable don-

née au fil de suspension. On peut considérer cette torsion comme exprimant la répulsion des points voisins : d'abord l'aiguille horizontale étant dans le méridien magnétique, l'action du globe ne doit pas être prise en considération; d'un autre côté, les points de l'aiguille verticale qui se trouvent à quelques millimètres au-dessus ou au-dessous du point de croisement ne contribuent pas à la répulsion, à cause de leur distance et de l'obliquité de leur action. Il en résulte qu'en faisant glisser l'aimant vertical le long de la règle, de manière à présenter tous ses points à l'action du pôle répulsif de l'aimant horizontal, on aura dans les degrés de torsion qu'il faudra imprimer au fil de suspension, pour maintenir cet aimant horizontal en contact avec la règle, des nombres proportionnels aux quantités de fluide magnétique répandu sur une moitié de cet aimant vertical, et conséquemment sur tout le barreau, puisque les deux moitiés sont semblables.

Quand on fait ces expériences sur des fils aimantés, on trouve que, s'il faut une torsion de 7 à 8 cercles, lorsque le point de croisement est à 2 lignes de l'extrémité du fil vertical, il ne faut que deux ou trois cercles de torsion, à 2 pouces; et lorsque l'extrémité de ce fil dépasse de 3 pouces le fil horizontal, la répulsion est presque nulle.

Nous ferons ici l'observation que nous avons déjà faite, lorsque nous avons recherché la loi des actions magnétiques; c'est qu'il ne faut employer que des fils d'excellent acier et fortement trempés, afin que l'état magnétique des deux barreaux ne soit pas changé par leur action réciproque; pour la même raison, il faut avoir l'attention de ne pas leur donner un très-fort degré de magnétisme.

401. Coulomb est encore parvenu à la même détermination par une voie différente.

Cette autre méthode consiste à placer d'abord le fil horizontal dans le méridien magnétique, et à compter le nombre d'oscillations qu'il fait dans un temps donné lorsqu'on l'écarte tant soit peu de ce plan. Les principes de mécanique nous apprennent que l'action du globe est proportionnelle au carré de ce nombre. Si l'on reprend l'expérience en présentant à un fil horizontal un fil vertical semblable, de manière que les pôles de nom contraire soient en regard; si l'on écarte de nouveau le fil horizontal du méridien magnétique, il y reviendra plus rapidement que lorsque le fil vertical n'agissait pas sur lui, parce qu'il s'y trouvera ramené par les actions combinées du globe et du fil. La première de ces forces est connue; si donc l'on retranche le carré du nombre d'oscillations faites par le fil soumis à l'action du globe, du carré du nombre d'oscillations faites par le fil soumis à la double action du globe et du fil vertical, pendant le même temps, on aura l'action exercée par le fil vertical.

Le point *A* situé à la hauteur du fil horizontal (*fig.* 228) sera celui dont l'action se fera sentir davantage, parce qu'il agit directement dans le plan horizontal où elle oscille. Les deux points voisins exercent aussi chacun une action : l'une plus faible, l'autre plus forte que celle du point *A*, de sorte que leur demi-somme lui est sensiblement égale; ainsi, dans chaque expérience, la partie du fil dont l'action sera la plus puissante, exercera une force totale, proportionnelle au magnétisme du point *A* situé dans le plan de l'aiguille. A l'extrémité de l'aiguille où

l'accroissement est très-rapide, Coulomb double l'effet observé. (Ceci n'est qu'approximatif.)

Résultats obtenus avec un fil de 27 pouces de longueur et 2 lignes de diamètre.

Distance à l'extrémité boréale du fil d'acier.	Nombres représentant les intensités du magnétisme libre.
0 pouces	165
1	90
2	48
3	23
4,5	9
6	6

La figure 229 offre la représentation de la distribution magnétique des barreaux aimantés.

402. Comment se trouve disposé le magnétisme dans les aimans? Voici les hypothèses principales :

1°. Avant les travaux de Coulomb on supposait les deux fluides transportés par l'acte de l'aimantation aux deux extrémités des boussoles. Suivant Coulomb, les fluides boréal et austral n'éprouvent que des déplacemens infiniment petits, et ne sortent pas de la molécule à laquelle ils appartenaient avant l'aimantation. L'opinion de ce célèbre physicien est établie sur les deux faits suivans.

Si l'on présente un aimant à un amas d'aiguilles de fer ou d'acier non trempé, il en enlèvera un grand nombre qui s'attachent à la suite les unes des autres. Soustrait-on les aiguilles à l'influence de l'aimant? elles se remettent dans l'état naturel et le barreau n'a rien gagné ni rien perdu.

Le second fait c'est qu'un fragment d'un aimant naturel ou artificiel, quelque petit qu'il soit, possède les deux pôles boréal et austral.

2°. M. Ampère considère dans un aimant un système de courans perpendiculaires à son axe. (*Voyez* les phénomènes électro-dynamiques.)

Action du globe sur les aimans.

403. 1°. Une aiguille aimantée transportée dans des lieux peu éloignés conserve sensiblement la même direction. Cela est encore vrai, soit qu'on s'élève dans la verticale, soit qu'on pénètre dans l'intérieur de la terre. Pour commencer à découvrir quelque léger changement dans la direction d'une aiguille aimantée ordinaire, il faut que les points d'observations soient distans de plusieurs lieues. On a conclu de ce fait que la force magnétique du globe pouvait être censée agir, comme la pesanteur, parallèlement à elle-même, dans les lieux peu éloignés, et que conséquemment toutes les considérations de mécanique relatives à l'équilibre des corps pesans, étaient applicables aux corps magnétiques. Il faut seulement se rappeler qu'ils sont à la fois pesans et magnétiques.

On démontre, par le calcul, que l'intensité magnétique du globe en un lieu donné, est proportionnelle au carré du nombre d'oscillations faites par une aiguille dans un temps déterminé. Si une aiguille est portée dans deux lieux différens, et quelle fasse N oscillations dans le premier, et N' dans le second, pendant le même temps, on aura $G : G' :: N^2 : N'^2$; G et G' étant les intensités magnétiques du globe dans les deux lieux.

2°. L'aimantation d'un barreau d'acier n'en change pas les poids, ce qui prouve que la *résultante verticale* des forces magnétiques *est nulle*.

3°. Une aiguille aimantée placée sur un flotteur, ou suspendue à un fil de cocon, se dirige dans le méridien magnétique, mais ne prend aucun mouvement ni vers le nord ni vers le sud, d'où l'on conclut que les forces magnétiques horizontales du globe se font équilibre.

4°. Un barreau d'acier ou de fer non trempé, mis dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, acquiert des pôles en quelques minutes. Ces pôles sont dirigés comme ceux de l'aiguille d'inclinaison. Le renversement du barreau amène le renversement des pôles. On constate l'état magnétique du barreau en présentant le même pôle d'une aiguille aimantée aux deux extrémités de ce barreau; l'aiguille est repoussée par l'une et attirée par l'autre. Si le barreau est de fer doux, ou d'acier non trempé, son aimantation est instantanée, et cesse dès qu'on le soustrait à l'action du globe, c'est-à-dire, qu'on le place dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison. Si ce barreau est en acier trempé, le développement du magnétisme est très-lent, mais, dès qu'il est produit, il se conserve.

Parlons maintenant de la déclinaison et de l'inclinaison.

Déclinaison.

404. Nous avons déjà dit que l'aiguille aimantée prend dans le même lieu et dans le même temps une direction déterminée. Nous avons vu (n° 395) qu'écartée du plan magnétique, elle y est ramenée par une force proportionnelle au sinus de l'angle d'écartement.

Si l'on porte l'aiguille successivement sur les différens points du globe, on en rencontrera quelques-uns où sa direction sera celle du méridien du lieu. Dans d'autres

elle s'écartera de ce plan, tantôt vers l'occident, tantôt vers l'orient.

405. La courbe qui passe par les différens points où la déclinaison est nulle est très-irrégulière. Il y a plusieurs courbes de cette nature; on les appelle *lignes sans déclinaison*. On en a reconnu quatre : la première dans le grand océan entre l'ancien et le nouveau monde; la seconde, à peu-près opposée à la précédente, prend naissance dans l'océan austral, au sud de la Nouvelle-Hollande, et se continue au nord jusque dans la Laponie. Une troisième se sépare de celle-ci, près du grand archipel d'Asie, et s'élève jusqu'à la partie orientale de la Sibérie. Enfin, on a encore trouvé des traces d'une ligne sans déclinaison dans l'océan pacifique, près des îles des Amis et de la Société. La position des lignes sans déclinaison n'est pas constante sur le globe.

En général la boussole n'a pas la même direction, ou, en d'autres termes, la déclinaison change de ligne aux deux côtés de la ligne sans déclinaison. On a reconnu que la ligne sans déclinaison qui traverse une partie de la Sibérie, s'écarte de cette règle; la boussole placée à droite et à gauche de cette ligne, se tourne vers l'orient.

A Paris, en 1580, la déclinaison était orientale de 11° 30′; en 1653, la direction de l'aiguille était celle du méridien. Après être restée deux ans dans cette position, elle a marché vers l'occident. Voici quelques observations :

En 1678, la déclinaison occidentale était de	1° 30′
En 1700.	8° 18′
En 1780.	19° 55′
En 1805.	22° 5′

En 1816. . . . . 22° 25′

En 1818. . . . . 22° 26′

D'après un nombre très-considérable d'observations faites à l'Observatoire par M. Arago, il paraît que l'aiguille se rapproche actuellement du méridien, c'est-à-dire que sa déclinaison diminue. Des observations de M. le colonel Beaufoy, faites près de Londres, conduisent à la même conséquence. La rétrogradation annuelle entre 1818 et 1822 a été de 2′ environ.

On a admis aussi que l'aiguille aimantée conserve la même direction pendant un certain nombre d'années; ainsi, à Paris, de 1720 à 1724, elle se tint constamment à 13 degrés du méridien. Mais comme à cette époque la variation diurne n'était pas connue, on n'observait pas l'aiguille aimantée comme on le fait aujourd'hui à différentes heures du jour. Il serait donc possible que l'aiguille eût varié dans l'intervalle de 1720 à 1724, sans qu'on s'en fût aperçu.

406. L'aiguille aimantée est soumise à une variation diurne particulière, dont la marche a été suivie par Graham Canton, Van Swinden, Cassini; d'après ce dernier, le maximum de la déclinaison diurne a lieu entre midi et trois heures du soir; alors l'aiguille est stationnaire; elle se rapproche ensuite du méridien terrestre jusque vers huit heures du soir; puis elle reste stationnaire pendant toute la nuit. Le lendemain, à huit heures du matin, elle commence à s'éloigner du méridien, et ainsi de suite. C'est entre les mois d'avril et de juillet qu'ont lieu les plus grandes variations diurnes; elles sont à Paris de 13′ à 16′; les plus petites sont de 8′ à 9′. Ces dernières ont lieu dans l'autre partie de l'année.

L'étendue de la variation diurne n'est pas la même dans tous les pays. A Londres, elle est aux mois de juin et de juillet, de 19′ à 20′; et au mois de décembre, elle n'est plus que de 7′ à 8′ : la différence est, comme on voit, plus grande qu'à Paris.

M. de Humboldt à Berlin et dans l'Amérique méridionale, M. Kupfer à Kasan, etc., etc., ont constaté aussi la variation diurne.

M. Arago observe depuis plusieurs années, avec le plus grand soin, le même phénomène à Paris.

Les observations de Macdonal et de M. Freycinet, montrent que la variation diurne est sensiblement moindre entre les tropiques que dans nos climats. M. Duperey a reconnu qu'il n'est pas vrai, comme on l'avait cru, que la variation diurne soit nulle dans tous les points de l'équateur magnétique. (*Connaissance des temps*, 1828.)

La comparaison des positions analogues de l'aiguille à différens jours, mais aux mêmes heures, a établi que depuis l'équinoxe du printemps jusqu'au solstice d'été suivant, la pointe nord revient vers l'est, et qu'elle marche vers l'ouest le reste de l'année.

Cette variation a été découverte par M. Cassini en 1784. M. Gilpins l'a confirmée en 1800. D'une autre part, M. Arago, par la discussion des observations de M. Bowditch aux États-Unis, et de M. Beaufoy à Londres, a reconnu que dans le premier pays la période est transportée (en 1811) à une autre époque de l'année, et que dans le second, la variation annuelle ne s'est pas manifestée de 1817 à 1820. Ainsi de nouvelles observations sont nécessaires sur ce sujet.

Il résulte encore d'observations multipliées, que l'ai-

guille aimantée est sujette à des variations brusques et accidentelles, qui se manifestent surtout à l'apparition des aurores boréales. (*Voyez* l'aurore boréale.)

407. La boussole ordinaire est représentée dans la figure 230; c'est tout simplement une aiguille aimantée renfermée dans une boîte et libre de se mouvoir dans le plan horizontal.

Il faut autant que possible diminuer le frottement; c'est pourquoi, voulant rendre les aiguilles très-légères, on borne l'épaisseur au degré nécessaire pour qu'elles ne se déforment point par la flexion. On forme aussi la chape avec un corps dur (agate), afin que le pivot ne la pénètre pas. Il résulte encore des expériences de Coulomb que les aiguilles en flèche ont, à poids égal, une force directrice plus considérable.

La trace de la résultante horizontale des forces magnétiques, se trouve dans le méridien magnétique; pour la déterminer avec rigueur, on fait l'opération du retournement. On observe d'abord l'aiguille dans une position; on la retourne, et l'on fait une seconde observation. Le méridien magnétique est évidemment placé entre les deux directions de l'aiguille, lesquelles sont en général peu différentes.

Quand il s'agit de déterminer de petits mouvemens de l'aiguille comme ceux des variations diurnes et annuelles, on doit l'observer par le moyen de lunettes fixes. L'aiguille de l'Observatoire de Paris consiste en une aiguille aimantée *A B* (*fig.* 231), suspendue par un fil de soie sans torsion. Le mouvement de l'aiguille indiqué par un cercle *C D*, est observé à l'aide de lunettes *L* et *L'*. L'aiguille et

son fil de suspension sont renfermés dans une boîte, et soustraits ainsi aux agitations de l'air.

De l'Inclinaison.

408. Une aiguille d'acier suspendue par son centre de gravité et non aimanté, reste dans une position horizontale. Dès qu'elle est aimantée, elle s'incline sensiblement. Dans notre hémisphère l'extrémité boréale s'abaisse au-dessous de l'horizon; c'est le contraire dans l'hémisphère austral. On a donné à cette déviation le nom d'*inclinaison*. De sorte que l'inclinaison est l'angle formé par l'aiguille et le plan horizontal.

L'inclinaison n'est pas constante dans le même lieu : en 1798 elle était à Paris de 69° 51′; en 1810, de 68° 50′; en 1818, de 68° 35′; et à Londres, en 1775, elle était de 72° 30′, en 1805 de 70° 21.

M. Hansteen a annoncé avoir reconnu que l'inclinaison est environ de 15′ plus grande en été qu'en hiver, et de 5′ ou 6′ plus grande le matin que l'après-midi. Si aucune cause d'erreur ne s'est glissée dans les expériences de ce savant norwégien, l'aiguille d'inclinaison éprouverait, comme l'aiguille horizontale, des variations diurnes et annuelles. D'une autre part, d'après M. Gilpins, l'inclinaison ne subit pas à Londres de variation sensible.

409. On appelle *équateur magnétique* la courbe formée par la suite des points où l'aiguille d'inclinaison prend une position horizontale. L'équateur magnétique, abstraction faite des inflections, est un grand cercle incliné sur l'équateur terrestre de 12 degrés environ. Du moins c'est ce qu'indiquent les observations faites sur une étendue de

plus de 180° de longitude dans l'océan altantique, la mer des Indes et la partie du grand océan qui baigne les côtes de l'Amérique méridionale.

Il paraît que l'équateur magnétique coupe l'équateur terrestre au moins en quatre points ou nœuds. La position de ces nœuds, la forme de la ligne sans inclinaison, ont été déterminés avec beaucoup de sagacité par M. Morlet et par M. Hansteen. Ce dernier avait été conduit à admettre l'existence d'un mouvement de translation dans l'équateur magnétique, et de plus que l'inclinaison de l'aiguille diminue dans un lieu où le mouvement de l'équateur tend à se rapprocher de ce dernier, et qu'elle augmente dans le cas contraire. Cette opinion est confirmée par les observations de M. Freycinet et de M. Duperey. (*Connais. des temps*, 1826.)

410. La plus grande inclinaison dans l'hémisphère austral a été observée par le capitaine Cook à 60° 40′ de latitude, et à 93° 45′ de longitude occidentale; comptée du méridien de Paris, elle était de 43° 45′.

Les voyageurs se sont approchés davantage du pôle boréal, et l'on a conséquemment observé des inclinaisons plus considérables. Ainsi le capitaine Phipps a trouvé l'inclinaison de 82° 9′ sous la latitude de 79° 44′. Le capitaine Parry a observé des inclinaisons peu différentes de 90°, et même ayant dépassé les 100° de longitude occidentale sous la latitude 74° 45′, il a vu le pôle nord de la boussole se retourner et se diriger vers le sud, ce qui prouve qu'on avait dépassé le pôle boréal du globe. (*An. ch. et phys.*, t. 15.)

L'aiguille d'inclinaison, qui sert aujourd'hui aux observations de l'Observatoire de Paris, est représentée dans la

figure 232. Deux loupes mobiles permettent d'apprécier l'angle d'inclinaison indiqué sur le cercle vertical *C D*. Comme il est rare que l'aiguille soit exactement centrée, les deux extrémités ne correspondent pas rigoureusement aux mêmes points; mais la moyenne des deux angles peut être considérée comme l'inclinaison véritable.

De l'Intensité de l'action magnétique du globe.

411. On peut se proposer plusieurs questions relativement à l'intensité magnétique du globe. Cette intensité s'exerce-t-elle avec le même degré d'énergie, 1° à de grandes distances; 2° sur tous les points du globe; l'intensité subit-elle comme la déclinaison des variations diurnes et annuelles; par quel moyen peut-on s'assurer si l'intensité du globe éprouve quelque variation à de grands intervalles de temps? Par exemple, quel genre d'observation doit-on faire aujourd'hui et dans deux siècles pour déterminer si notre globe a ou n'a pas conservé la même intensité magnétique?

Pour déterminer l'intensité magnétique, il est à peu près indifférent d'observer l'aiguille de déclinaison ou d'inclinaison; seulement pour passer des résultats de la première aux résultats que fournirait la seconde, il faudra diviser le carré des oscillations de l'aiguille horizontale, par le cosinus de l'angle d'inclinaison, ce qui se voit par l'inspection de la figure 233. R, étant la résultante des forces magnétiques, et i' l'angle d'inclinaison, on a $R \cos i'$ pour la composante horizontale (n° 30). Le mode de suspension de l'aiguille d'inclinaison pouvant, à cause du frottement, occasioner des inexactitudes, on observe en général plus souvent l'aiguille horizontale.

1°. L'action magnétique du globe s'étend à de grandes distances sans perdre de son énergie, c'est ce qui résulte d'observations faites successivement par Saussure sur le Mont-Blanc, M. de Humboldt sur le Chimborazo, M. de Rossel à la Nouvelle-Hollande, et par MM. Gay-Lussac et Biot dans une ascension aérostatique.

2°. Les recherches de M. de Humboldt ont dévoilé un fait très-remarquable, qui consiste dans l'accroissement de l'intensité de l'action du globe en allant de l'équateur magnétique aux pôles. En effet, l'aiguille d'inclinaison, qui, au départ de M. de Humboldt pour son voyage dans le Nouveau-Monde, faisait à Paris 245 oscillations en 10 minutes, n'en faisait plus que 211 au Pérou. Il n'est pas à craindre que cette différence soit une suite du changement de température subi par l'aiguille; car, rapportée à Paris, elle a encore fait des oscillations aussi rapides qu'avant le départ : le rapport de l'intensité magnétique du globe, au Pérou et à Paris, sera le rapport des carrés des nombres oscillatoires dans le même temps, c'est-à-dire $\overline{211}^2 : \overline{245}^2$ ou 44521 : 60025 ou 10 : 13,5.

L'importante découverte de l'accroissement de l'intensité magnétique, à mesure qu'on s'approche des pôles, a été confirmée par les observations ultérieures de MM. les capitaines Parry, Freycinet, etc.

3°. Plusieurs savans ont cherché à apprécier si l'intensité magnétique du globe subit dans le même lieu des variations pendant la durée d'un jour ou d'une année. Nous rapporterons les résultats de M. Hansteen, qui s'est occupé de ce sujet dans ces derniers temps. L'aiguille qui a servi aux observations de M. Hansteen, est cylindrique; elle a

2 pouces $\frac{3}{4}$ de long et $\frac{3}{4}$ de diamètre. Elle est suspendue par un fil de soie sans torsion; et afin d'éviter l'influence de l'agitation de l'air, elle est renfermée dans une boîte sur le fond de laquelle est tracé un cercle gradué à l'aide duquel on évalue les amplitudes des oscillations. C'est d'ailleurs un appareil analogue qu'on emploie partout pour mesurer la durée des oscillations. M. Hansteen ne commence à compter les oscillations que lorsque la demi-amplitude est réduite à 20°. Un chronomètre donne la durée moyenne d'un nombre constant d'oscillations; et comme les intensités du globe sont en raison inverse de ces durées élevées au carré, on a le rapport. M. Hansteen a pris pour unité la durée 813',6, de 300 oscillations; l'intensité J pour une durée T est obtenue par la proportion $J : 1 :: (813', 6)^2 : T^2$ d'où $J = \frac{(813' 6)^2}{T^2}$: c'est à l'aide de cette formule que M. Hansteen a calculé toutes ses expériences. Pour que le lecteur ait une idée de l'influence de la durée des oscillations sur l'intensité, nous rapporterons quelques résultats particuliers.

Durée des 300 oscillations.	Intensités.
813",6	1,0000
812,0	1,0030
810,0	1,0089
808,0	1,0159
806,0	1,0215
804,0	1,0240

M. Hansteen a suivi ses observations à différentes heures de la journée, pendant les différens mois de l'année. Il en a tiré les conclusions suivantes :

L'intensité magnétique est sujette à une variation diurne. Le minimum d'intensité a lieu entre 10 et 11 heures

du matin, et le maximum entre 4 et 5 heures de l'après midi.

L'intensité moyenne varie pendant l'année. L'intensité moyenne des jours rapprochés du solstice d'hiver, surpasse l'intensité moyenne des jours semblablement placés relativement au solstice d'été. Les variations d'intensité moyenne d'un mois à l'autre sont à leur maximum vers les solstices, et à leur minimum vers les équinoxes.

Comme toutes les observations de M. Hansteen ont été faites avec une aiguille horizontale, il serait possible que les variations indiquées tinssent à un changement plutôt dans la direction que dans l'intensité de la résultante magnétique. En effet, R étant cette résultante, la composante horizontale sera $H = R \cos i$. En sorte que H peut changer quoique R soit constant; il suffit que i éprouve une légère variation. M. Hansteen attribue au changement d'inclinaison les variations d'intensités qu'il a observées.

D'autres physiciens ont été conduits aussi à admettre la variation de l'intensité magnétique; mais comme toutes les variations sont peu considérables, et qu'elles pourraient s'expliquer par un changement de 2 ou 3 minutes dans l'inclinaison, et que l'aiguille d'inclinaison n'a pas en général assez de sensibilité pour qu'on puisse répondre de 2 ou 3 minutes, il serait possible que ce qu'on prend pour un changement dans l'intensité magnétique, ne fût que le résultat d'un changement d'inclinaison; il se pourrait aussi qu'il y eût tout à la fois variation dans l'inclinaison et dans l'intensité. L'opinion des personnes qui se sont le plus occupées de cette matière, n'est pas encore arrêtée.

4°. Les moyens employés pour déterminer les variations

diurnes et annuelles de l'intensité magnétique, ne sont nullement propres à faire connaître les variations séculaires, parce qu'on n'a pas la certitude de conserver à un aimant quelconque la même énergie pendant un long espace de temps. M. Arago et M. Poisson ont proposé chacun un moyen de lever cette difficulté.

M. Arago pense qu'on pourrait s'assurer de la manière suivante, si un aimant a un degré de puissance déterminé. Ce moyen est fondé sur ce qu'une aiguille aimantée, placée dans le voisinage d'une plaque métallique tournante, est entraînée avec d'autant plus de force, que son degré de magnétisme est plus intense. Pour faire cette expérience, il faut placer l'aiguille dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison; de cette manière on n'aura pas à craindre l'influence du globe; le petit poids *p*, dont l'aiguille devra être munie pour se tenir dans une position déterminée, par exemple, à 20° de sa position naturelle, sous l'influence d'une plaque de cuivre d'une épaisseur et d'un diamètre donnés, et placée à une distance bien connue, permettra d'apprécier si l'aiguille s'est conservée ou ne s'est point conservée dans le même état magnétique. Si l'état magnétique n'a pas changé, l'aiguille pourra servir à la mesure de l'intensité du globe; s'il a changé, il faudra la remettre dans l'état primitif. Un morceau de fer ne pourrait pas être employé pour apprécier l'état magnétique d'une aiguille à de longs intervalles de temps, parce que ce métal ne peut pas être toujours obtenu identique, avantage qu'offre le cuivre.

M. Poisson propose de faire osciller deux aiguilles séparément sous l'influence du globe, ensuite chacune sous l'influence du globe et de l'autre aiguille, et à l'aide

des résultats des oscillations il trouve par le calcul une quantité qui est liée à l'intensité absolue du globe. Cette quantité est indépendante de la puissance de chacune des aiguilles, il faut seulement que cette puissance n'éprouve pas de variation pendant l'expérience. (Voyez *An. ch. et ph.*, t. 30, p. 259.) (1).

---

(1) Dans tout ce qui précède, on a supposé l'aiguille placée dans le méridien magnétique. Il est intéressant de voir la décomposition que subit la résultante lorsqu'on place l'aiguille hors de ce plan.

Soit R la résultante des forces magnétiques. Supposons cette force appliquée en un point m d'une aiguille (*fig.* 234); soient menées une verticale $m\,z$ et une horizontale $m\,n$, parallèle au méridien magnétique. Soit i l'angle de la verticale avec la résultante, on aura pour les composantes horizontale et verticale, $R \sin i$ et $R \cos i$. La composante verticale $R \cos i$ est dans le plan actuel de l'aiguille : il faut décomposer la composante horizontale $m\,n = R \sin i$ en deux autres, l'une $m\,k$ perpendiculaire à $m\,A$, et l'autre dans la direction $m\,A$. La première égale $R \sin i \sin \phi$, est détruite par la résistance de l'aiguille, puisque nous supposons cette dernière fixée dans le plan $B\,C\,A$, l'autre égale à $R \sin i \cos \phi$, tendra avec la composante verticale $R \cos i$, à donner une position fixe à l'aiguille. (ϕ est ici l'angle que fait le plan de l'aiguille avec le méridien magnétique.) La résultante totale R' donnera $R'^2 = R^2 \cos^2 i + R^2 \sin^2 i \cos^2 \phi = R^2 \cos^2 i\,(1 + \tang^2 i \cos^2 \phi)$, d'où $R' = R \cos i \sqrt{1 + \tang^2 i \cos^2 \phi}$. La direction de la résultante R' sera donnée par la formule $\tang i' = \dfrac{R \sin i \cos \phi}{R \cos i}$, ou $\tang i = \tang i \cos \phi$.

Cette formule peut être soumise à quelques épreuves. Supposons $\phi = 0$, R' deviendra $R \cos i \sqrt{1 + \tang^2 i} = R \cos i \dfrac{\sqrt{\sin^2 i + \cos^2 i}}{\cos i} = R$. Si $\phi = 100°$, on aura $R' = R \cos i$; la résultante est alors égale à la composante verticale $R \cos i$; elle en a aussi la direction; car pour $\phi = 100°$, $\tang i' = \tang i$. On vérifie ce résultat par l'expérience. Après avoir déterminé le méridien magnétique, qu'on place perpendiculairement à ce plan une aiguille d'inclinaison, on la verra prendre une direction verticale. La formule $\tang i' = \tang i \cos \phi$, peut

De l'action réciproque des Aimans et des différens corps.

412. Nous avons dit en commençant l'étude du magnétisme que les seuls métaux magnétiques jusqu'à présent connus, étaient le fer, le nickel, et le cobalt. Ce sont en effet les seuls auxquels on ait pu imprimer un état magnétique énergique et durable; cependant il résulte des recherches de Coulomb, que des aiguilles fines et légères de toutes les substances, suspendues à des fils de soie, entre les pôles de deux aimans puissans, se dirigent toujours dans le sens de ces pôles. De plus, si l'on compte le nombre d'oscillations que ces différentes aiguilles font quand on les dérange de leur position d'équilibre, on trouve qu'elles oscillent plus rapidement en présence des aimans, que lorsqu'elles sont isolées dans l'espace.

Quelle conséquence doit-on tirer de ces résultats? doit-on considérer toutes les substances comme jouissant de la propriété d'acquérir la vertu magnétique, ou bien faut-il attribuer ces effets à la présence de quelques parcelles de fer. C'est ce que l'état de la science ne permettait pas de décider avant les nouveaux faits découverts par M. Arago.

---

conduire à un résultat curieux. En effet, on aurait de même tang $i'' =$ tang i cos $(\delta \pm 100)$, d'où tang^2 i' + tang^2 i'' = tang^2 i. Cette équation fournit le moyen d'avoir l'inclinaison dans le méridien magnétique sans qu'on connaisse le plan. Il suffira de prendre l'inclinaison dans deux plans perpendiculaires. Ce procédé peut être utile pour vérifier des observations dans le méridien magnétique. Si l'on voulait comparer cette formule à quelques observations, il faudrait faire attention que i représente ici le complément de ce qu'on prend ordinairement pour l'inclinaison.

Ces faits sont de deux espèces : les premiers ont pour objet l'influence *des corps en repos* sur le mouvement de l'aiguille aimantée; les seconds, l'influence *des corps en mouvement* sur l'aiguille en repos. Les premiers faits décident complètement ce qui n'était que douteux. Le procédé de Coulomb était applicable aux corps solides seulement; celui de M. Arago peut être appliqué à tous les corps solides, liquides et même gazeux. Les effets observés par Coulomb étaient assez faibles pour qu'on n'ait pas osé arrêter une opinion; ceux qu'a observés M. Arago ne laissent plus aucun doute sur l'action de tous les corps, comme le montreront les résultats suivans.

Une aiguille aimantée est suspendue à un fil vertical. Écartée de 53° du méridien magnétique, elle y revient par une suite d'oscillations de plus en plus petites. Si l'on note le nombre d'oscillations nécessaires pour que la déviation soit réduite à 43°, on voit que ce nombre varie avec la nature de la substance au-dessus de laquelle oscille l'aiguille.

EXEMPLES.

Eau.

A 0mm, 65 de distance, l'aiguille perd 10° en	30 oscillations.
A 52mm, 20	60

Glace (eau gelée).

A 0mm, 65 de distance, l'aiguille perd 10° en	26 oscillations.
A 52mm, 20	60

Plan de verre (*Crown. glass.*).

L'aiguille n'est pas la même; la déviation primitive est 90, on arrête l'expérience à 41°.

A 0mm, 91 de distance, l'aiguille perd 49° en	122 oscillations.
A 4mm, 01	220

Les résultats fournis par les métaux, et surtout par le cuivre, sont plus marqués. Un plateau de ce dernier métal réduit à 4 le nombre d'oscillations appréciables d'une aiguille qui, dans l'air, et hors de l'influence du cuivre, en fait plus de 400 appréciables.

Il est bien démontré par ces expériences qu'une aiguille aimantée éprouve de la part de tous les corps, et surtout des métaux, une influence qui *diminue* rapidement *l'amplitude des oscillations* sans en altérer la durée.

Dans les expériences précédentes, une aiguille en mouvement est arrêtée par un corps en repos : dans d'autres expériences, M. Arago, guidé par ce principe de mécanique que la réaction est égale à l'action, est parvenu à entraîner une aiguille en repos par une plaque en mouvement.

L'appareil employé dans ces nouvelles expériences se compose de deux parties isolées l'une de l'autre. La première est une horloge dont tous les rouages sont en cuivre; elle imprime à la plaque un mouvement de rotation régularisé par un volant, et dont on mesure la vitesse à l'aide d'une aiguille qui indique le nombre des révolutions accomplies dans un temps déterminé. La seconde partie consiste en un cylindre en verre, fermé, à sa partie inférieure, par une feuille de papier, et à sa partie supérieure par une plaque de verre, au centre de laquelle est fixée une tige en cuivre qui s'abaisse ou s'élève à volonté, et qui porte le fil auquel est suspendue l'aiguille aimantée. Une alidade indique la direction de l'aiguille dont on fait coïncider le centre avec celui de la plaque tournante.

Une vitesse de rotation assez petite, imprimée à une plaque métallique, fait dévier l'aiguille d'une manière no-

table. Si ce mouvement est lent et uniforme, l'aiguille se fixe dans une position déterminée. Si le mouvement est assez rapide pour produire une déviation de plus d'un angle droit, l'aiguille est entraînée; décrit une circonférence entière, et continue son mouvement avec une vitesse qui va en augmentant jusqu'à ce que la plaque cesse de tourner. Pour donner une idée de l'intensité de l'influence dont il s'agit, nous citerons un résultat.

Une plaque de cuivre, épaisse d'environ une ligne, se mouvant avec une vitesse de 4 à 5 tours par seconde, imprime, à la distance de plus d'un pouce, un mouvement de rotation à un barreau aimanté dont la longueur est un peu moindre que celle du diamètre du disque tournant (1).

Si l'on pratique, à une petite distance du centre, des fentes étroites dans le disque, il produit à peine une déviation de quelques degrés.

M. Arago voulant avoir une donnée sur le pouvoir magnétique du cuivre hors de l'état de mouvement, a soumis une aiguille à l'action d'un barreau de ce métal, et a observé, à $\frac{1}{10}$ de millimètre de distance, un déplacement angulaire de 2′ environ.

L'importance des nouveaux faits dont M. Arago vient d'enrichir la science est d'autant plus grande que le lien

---

(1) M. Arago remarque (*An. ch. et ph.*, t. 33, p. 223) 1° que le mouvement de rotation du verre, du papier, est sans effet sur l'aiguille aimantée, dès que cette dernière est séparée de ces substances par un écran; 2° que l'action amortissante de ce corps, en cela très-différente de celle des métaux, pourrait bien n'être qu'une action de surface; 3° qu'enfin, pour ce sujet, des expériences dans le vide sont nécessaires.

qui les rattache aux faits anciens est moins connu. (*Ann. chim. et phys.*, t. 32, p. 213.) (*Société phyl.*, 1825.) Le point sur lequel il faut surtout arrêter son attention, c'est que le *mouvement* augmente la puissance magnétique des corps.

Les expériences curieuses de M. Arago ont été répétées et confirmées par les physiciens étrangers. MM. Herschell et Babade ont remarqué de plus qu'en remplissant les intervalles vides pratiqués dans une plaque, par un métal dont l'influence magnétique est très-inférieure, on rend à la plaque sensiblement toute son énergie.

La théorie de l'influence des plaques tournantes n'est pas encore complètement faite. On a supposé que chaque pôle de l'aiguille donne naissance à un pôle de nom contraire qui se déploie dans la surface de la plaque, et qui disparaît moins vite qu'il n'est formé. Mais les conséquences de cette hypothèse sont opposées aux faits. En effet, si l'on suspend à l'aide d'un fil, un aimant au fléau d'une balance, qu'on met en équilibre, l'aimant sera repoussé par un plateau en cuivre qu'on fera tourner au dessous de lui, puisque la balance penchera de l'autre côté. Outre les mémoires de M. Arago cités ci-avant, voyez un mémoire de M. Poisson. (*Ann. ch. et phys.*, t. 32, p. 225.)

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-DYNAMIQUES.

413. M. OErsted, de l'Académie de Copenhague, a découvert, en 1819, un phénomène tout-à-fait remarquable, celui de l'action du courant voltaïque sur l'aiguille aimantée. Cette découverte a donné lieu à un grand nombre de belles recherches en France et dans le reste de l'Europe.

Nous exposerons les principaux faits connus aujourd'hui sur cette nouvelle branche de la physique.

Voici en quoi consiste la découverte de M. OErsted.

Lorsqu'on approche d'une aiguille aimantée une portion quelconque du fil conducteur, on voit cette aiguille se détourner de sa direction primitive; c'est bien le courant qui détermine la déviation, puisque, si on l'interrompt, l'aiguille reprend aussitôt sa position.

Si l'énergie de la pile s'affaiblit, la déviation diminue.

L'électromètre ordinaire indique l'existence et l'intensité de la tension. Il manquait un instrument qui fît connaître la présence du courant électrique dans un conducteur ou dans une pile, et qui en indiquât la direction et l'énergie : cet instrument on le possède aujourd'hui : c'est la boussole.

Lorsque les faits découverts par M. OErsted furent connus en France, M. Ampère les analysa, et montra qu'ils se réduisaient tous aux deux faits généraux suivans :

Premier fait. *Action directrice.*

414. Supposons qu'une pile soit placée horizontalement,

à peu près dans la direction du méridien magnétique, et qu'on ait disposé dans la même direction une portion du fil conducteur; supposons de plus qu'une aiguille aimantée soit mise au-dessous ou au-dessus d'une portion de ce conducteur, elle sera déviée dans un sens qu'on pourra connaître d'après la règle suivante. Si l'on se place par la pensée dans la direction du courant et de manière que le courant soit dirigé des pieds à la tête, et qu'on ait la face tournée vers l'aiguille, c'est toujours à gauche que le pôle austral est porté par l'action du courant électrique.

Le même instrument peut servir à constater que le courant existe dans la pile, et qu'il se produit de l'extrémité négative à l'extrémité positive, c'est-à-dire en sens inverse de celui du conducteur. Ce qui doit être, puisque le fil forme avec la pile un circuit fermé.

L'action du courant électrique tend à mettre l'aiguille dans un sens perpendiculaire à sa propre direction; mais l'action du globe empêche qu'on n'obtienne ce résultat, en sorte que l'aiguille s'arrête dans une position oblique au fil. On peut détruire l'influence du globe, ainsi que l'a fait M. Ampère, en fixant l'aiguille aimantée perpendiculairement à un axe auquel on donne la direction de l'aiguille d'inclinaison; alors elle fait un angle droit avec le fil conducteur.

M Ampère a été conduit à la construction de cet instrument par cette considération, que, quand une aiguille aimantée ne peut se mouvoir que dans un plan en tournant autour d'un axe perpendiculaire à ce plan, elle est toujours amenée, par l'action du globe, dans la situation où elle forme le plus petit angle possible avec la direction de l'aiguille d'inclinaison qu'elle prendrait si elle était libre, de

manière que son pôle austral soit le plus près possible du pôle austral de l'aiguille d'inclinaison. Il suit de là que quand on veut la direction de l'aiguille dans un plan quelconque, il faut projeter la direction de l'aiguille d'inclinaison sur le plan. La ligne de projection sera celle où s'arrêtera l'aiguille. Or, il est évident que si le plan est perpendiculaire à la direction de l'aiguille d'inclinaison, celle de l'aiguille aimantée formant toujours un angle droit avec elle et ne pouvant ni s'en approcher ni s'en éloigner, toutes les positions lui deviennent indifférentes. L'aiguille dont il s'agit ici, est représentée dans la figure 235. L'aiguille aimantée se meut dans l'espace d'un cercle divisé. On donne à ce cercle, et conséquemment à l'aiguille, toutes les positions désirées à l'aide de deux charnières a et a'. Les bâtons de verre C et C' soutiennent le fil conducteur de la pile.

SECOND FAIT. *Action répulsive ou attractive.*

415. Ce second fait consiste en ce qu'un fil conducteur et un aimant dont l'axe fait un angle droit avec la direction de ce fil, s'attirent quand le pôle austral est à la gauche du courant qui agit sur lui, c'est-à-dire quand la position est celle que le fil conducteur et l'aimant tendent à prendre en vertu de leur action mutuelle. Bien entendu, comme l'a remarqué M. Ampère, qu'il faut, pour que cette attraction ait lieu, que la droite qui mesure la plus courte distance entre le fil et l'axe de l'aimant rencontre cet axe entre les pôles; cette observation est d'autant plus importante qu'elle explique pourquoi l'action attractive devient nulle vis-à-vis du pôle et se change en répulsion quand la droite qui mesure la plus courte distance entre

le fil conducteur et l'axe rencontre cet axe au-delà du pôle; il y a au contraire répulsion quand le pôle austral est à droite, c'est-à-dire quand le fil conducteur et l'aimant sont maintenus dans une position opposée à celle qu'ils tendent à se donner; pourvu toujours que la ligne qui mesure la plus courte distance tombe entre les deux pôles; car, lorsqu'elle tombe au-delà, il y a attraction; l'action entre le fil conducteur et l'aimant est toujours réciproque dans tous les cas dont nous venons de parler, comme on peut s'en assurer en approchant un aimant d'un conducteur mobile.

Les faits suivans ont été ajoutés aux deux faits que nous venons d'énoncer et qui constituent la belle découverte de M. OErsted.

Attraction et répulsion des courans électriques.

416. Premier fait. M. Ampère, bientôt après la découverte de M. OErsted, démontra que deux courans électriques s'attirent quand ils se dirigent parallèlement dans le même sens, et qu'ils se repoussent quand leurs directions parallèles sont opposées. Il s'assura ensuite que la même chose a lieu, quel que soit l'angle des deux fils, aigu, droit ou obtus; en sorte qu'il y a toujours attraction quand les courans des deux fils vont tous deux en s'éloignant ou en s'approchant du sommet de l'angle formé par les deux fils (*fig.* 236), et répulsion dans le cas où l'un va en s'en approchant, et l'autre en s'en éloignant (*fig.* 237).

Si les deux fils conducteurs sont parallèles entre eux, on doit les considérer comme formant un angle infiniment petit, dont le sommet est à une distance infinie. Si les

deux courans sont dans le même sens, ils vont tous les deux en s'approchant ou en s'éloignant du sommet infini, il doit y avoir attraction. Dans le cas où ils vont en sens contraire, il doit y avoir répulsion. C'est ce que confirme l'expérience.

Au reste, pour donner à la loi que nous venons d'énoncer toute la généralité dont elle est susceptible, il faut remarquer que, dans le cas où les deux fils conducteurs ne sont pas dans le même plan, on doit considérer comme le sommet de l'angle la ligne qui mesure la plus courte distance des deux fils.

417. Deuxième fait. Si l'on considère deux portions d'un même courant rectiligne comme deux courans qui forment un angle de 180° dont le sommet est au point qui les sépare, on verra que, le courant d'une des portions allant vers le sommet et l'autre s'en éloignant, il doit y avoir répulsion, comme M. Ampère l'a constaté par l'expérience suivante : Sur un plat *A B C D* (*fig.* 238), séparé par la cloison *A C* isolante, en deux compartimens égaux et remplis chacun de mercure, on place un fil de laiton recouvert de soie, dont les branches *q r*, *p n* peuvent flotter sur le mercure parallèlement à la cloison *A C*. Les extrémités nues *r s*, *n m* plongent dans le mercure. En faisant plonger dans la capsule *E* l'extrémité du fil positif, et dans la capsule *F* l'extrémité du fil négatif ou réciproquement, on établit deux courans indépendans l'un de l'autre, dont chacun a pour conducteur une partie de mercure et une partie solide : quelle que soit la direction du courant, on voit toujours les deux fils *r q* et *p n* marcher parallèlement à la cloison *A C* du côté opposé à celui où il arrive, ce qui indique une répulsion pour chaque fil entre le courant

établi dans le mercure et son prolongement dans le fil lui-même. Suivant le sens du courant, le mouvement du fil de laiton est plus ou moins facile, parce que, dans un cas, l'action exercée par le globe sur la portion horizontale *q p* s'ajoute à l'effet obtenu, et que dans l'autre, au contraire, elle le diminue et doit en être retranchée. Tandis que l'action du globe sur l'un des fils *r q*, est détruite par celle de l'autre fil parallèle *p n*, dont le courant va en sens opposé.

418. Troisième fait. Voyons ce qui arrive quand les deux courans sont à angle droit. Si un courant rectiligne et indéfini dans les deux sens agit sur un courant mobile dont la direction soit perpendiculaire à la sienne et qui ait une de ses extrémités près du courant indéfini, l'action qu'exercera le courant indéfini portera le courant mobile parallèlement à sa direction; le mouvement aura lieu dans le sens du courant indéfini lorsque le courant mobile va en s'en éloignant, et dans le sens opposé lorsqu'il va en s'en approchant; il suffit pour s'en convaincre de jeter les yeux sur les deux figures 239 et 240.

En effet, si l'on prend sur le courant *m n* à égale distance du point *o*, où il est le plus près du courant mobile, deux distances égales *o m* et *o n*, et que d'un point quelconque *c* du courant mobile on mène deux obliques *c m* et *c n*, elles seront égales et formeront des angles égaux avec les directions des deux courans; d'où il suit que deux petites portions du courant indéfini situées aux points *m* et *n*, agissent avec la même intensité sur une petite portion située en *c*. Mais des deux forces égales *c p* et *c q* qu'exercent ces deux petites portions, l'une est attractive et l'autre répulsive, d'où il suit qu'en formant un parallélogramme

sur leur direction, ce parallélogramme est un losange, et sa diagonale CR, qui est la résultante des deux actions, est évidemment parallèle à mn. Les résultantes des actions exercées sur les autres points du courant mobile AC, étant aussi parallèles à mn, il en sera de même de la résultante totale. Or, d'après ce que nous avons dit tout-à-l'heure sur l'action mutuelle de deux courans, on voit que dans la figure 239 c'est l'action entre m et c qui est répulsive, et celle qui existe entre n et c est attractive; d'où il suit que le courant mobile AC est porté dans le sens CR, qui est celui du courant indéfini mn. C'est le contraire dans la figure 240.

419. Quatrième fait. Si le courant mobile traversait le courant indéfini en s'étendant également des deux côtés, la direction du courant mobile irait en s'en approchant dans une moitié BA et en s'en éloignant dans la moitié AC (*fig.* 241); la première se porterait dans le sens BE, opposé à celui du courant indéfini, et l'autre moitié AC dans le sens CF qui est celui du courant indéfini; on aurait donc un couple mn composé de deux forces BE et CF, qui ne produirait plus de mouvement de translation, mais ferait tourner le courant mobile BC autour du point A, jusqu'à ce qu'il fût parallèle à MN et dirigé dans le même sens. Il est bon de remarquer que dans cette expérience comme dans toutes celles où le conducteur mobile ne vient pas frapper contre le conducteur fixe, il passe, en vertu de la vitesse acquise, au-delà de la position d'équilibre et y est ramené par une suite d'oscillations.

420. Ces attractions et ces répulsions électriques diffèrent essentiellement de celles que l'électricité produit dans l'état de repos.

Dans les attractions et répulsions électriques ordinaires, ce sont les électricités d'espèce opposée qui s'attirent, et celles de même nature qui se repoussent. C'est le contraire pour les courans électriques ; l'attraction a lieu entre ceux qui vont dans le même sens et la répulsion entre les courans qui vont en sens opposé. De plus, si deux fils conducteurs sont attirés, ils restent attachés tant que dure le courant électrique, tandis que dans l'électricité ordinaire la répulsion succède promptement à l'attraction ; on peut encore ajouter que les effets des courans électriques ont lieu dans le vide comme dans l'air, au lieu que l'électricité ordinaire se dissipe dans le vide.

Cinquième fait. *Rotation continue.*

421. M. Faraday ayant découvert qu'au moyen d'un aimant on pouvait imprimer à un fil conducteur un mouvement de rotation qui se continue toujours dans le même sens, M. Ampère produisit un mouvement semblable à l'aide de l'action mutuelle de deux fils conducteurs, et il montra que ce mouvement était une suite nécessaire de ce que nous venons de voir. Nous rapporterons plus loin l'expérience ; nous allons en expliquer la théorie.

Supposons d'abord un courant *M N* (*fig.* 242), et un courant *B A* dans un fil conducteur mobile autour d'une de ses extrémités *A*, en sorte qu'il décrit autour du point *A* une circonférence ; lorsque le courant ira de la circonférence au centre, c'est-à-dire dans le sens *B A*, et qu'il se trouvera dans la situation marquée *B A* dans la figure, il ira en s'éloignant de *M N* et sera conséquemment porté dans le sens du courant *M N* qui l'amènera dans la por-

tion $B' A$: il sera alors parallèle à $M N$ et dirigé en sens contraire; il sera donc repoussé et il prendra la position de $B'' A$: comme alors il ira en s'approchant du courant $M N$, il sera porté en sens contraire de ce dernier courant, et il arrivera en $B''' A$; se trouvant maintenant parallèle à $M N$ et dirigé dans le même sens, il sera attiré par le dernier courant, et sera porté en $B A$, d'où le même mouvement de rotation continuera indéfiniment.

Tant que le courant $M N$ est assez près du point A, l'action exercée par ce courant mobile sur le fil va en diminuant depuis la position $B A$ jusqu'à la position $B'' A$, parce que la distance entre les deux fils va en augmentant; mais si le courant $M N$ était fort loin de A, la différence de distance deviendrait insensible, et alors le calcul montre que l'action pour faire tourner $A B$ autour de A est la même dans les positions que prend successivement le conducteur mobile, la différence de distance pouvant être ici négligée. On rendra l'action uniforme, même pour une petite distance, entre les conducteurs fixe et mobile, en pliant le conducteur $M N$ de manière qu'il forme un cercle autour de A, car il est clair qu'alors son action pour faire tourner $A B$ autour du point A devient constante, et leur force sera dans le même sens.

422. Le sens dans lequel le conducteur mobile, dont nous venons de parler, tourne autour du point A, change lorsque l'on renverse la direction de l'un des courans. Mais lorsqu'on supprime le conducteur fixe, le conducteur mobile prend dans certains cas un mouvement de rotation continue, dont le sens ne change jamais, quelle que soit la direction que l'on donne au courant du conducteur mobile. Cette expérience est de M. Savary. Voici la disposi-

tion de l'appareil avec lequel on la réalise : Un cercle métallique (*fig.* 243) interrompu en *A* au moyen d'une petite pièce d'ivoire *C*, plonge dans de l'eau acidulée, communiquant avec une extrémité de la pile. L'autre extrémité de cette pile communique avec une petite coupe *O* pleine de mercure, où vient aboutir la pointe *p* sur laquelle repose le cercle, et qui communique avec ce cercle par le rayon *O C* ; un autre rayon *O E* soutient aussi le cercle, mais il est de matière isolante.

On voit l'appareil tourner constamment dans le sens *A E C*, quelle que soit la direction du courant qui le traverse. Supposons d'abord que le courant arrive par le centre, il se rendra par le rayon *O C* au point *C*, suivra le cercle de cuivre *A C E*, traversera l'eau acidulée par les lignes *m n*, *m' n'*, *m'' n''*, perpendiculaires au cercle, et ira se rendre dans le vase métallique. La répulsion ayant lieu dans le sens *m h*, *m' h'*, etc., et comme le cercle est mobile, il tournera dans le sens *C A E*. Si au contraire le pôle positif communique avec l'eau, alors le courant électrique arrivera perpendiculairement au cercle suivant les directions *n m*, *n' m'*, *n'' m''*, etc., et se dirigera dans le sens *c* pour se rendre à la coupe *O*. La répulsion ayant toujours lieu dans le sens *m h*, *m' h'*, le cercle tournera dans le même sens. On ne peut obtenir de mouvement de rotation en sens opposé qu'en substituant à ce cercle un autre cercle représenté par la figure 244.

423. Un contour quelconque *A B C D* (*fig.* 245) placé au-dessus d'un courant indéfini *m n*, et mobile autour de la verticale *q r* (en avant ou en arrière du conducteur horizontal), tend à se placer parallèlement au plan vertical passant par le conducteur fixe *m n*. Puisque la partie as-

cendante $B\,C$ est portée du côté où va le courant $m\,n$ parallèlement à ce courant, tandis que la partie $A\,D$ tend à se porter du côté opposé, ces deux actions concourent à donner au contour la position indiquée. Si l'on forme une hélice, et qu'on considère chaque spire comme un contour circulaire, l'hélice devra se mettre de manière que son axe soit perpendiculaire à ce courant fixe. C'est ce qui se vérifie par l'expérience.

Si l'on approche de l'hélice précédente une autre hélice parcourue également par le courant électrique, et qu'on distingue dans chaque hélice le pôle qui se trouve à gauche d'un homme qui regarde du côté du courant ascendant (des pieds à la tête), on remarque que si l'on présente l'extrémité gauche d'une hélice à l'extrémité droite de l'autre, il y a attraction entre ces deux extrémités, et qu'il y a répulsion entre les deux extrémités d'une même espèce. Le calcul montre que cette attraction est indépendante de la direction des deux hélices, pourvu que les autres extrémités soient à une distance assez grande pour pouvoir négliger leur action.

SIXIÈME FAIT. *De l'Aimantation produite par les courans électriques.*

424. Peu de temps après que la découverte de M. OErstedt fut connue à Paris, M. Arago présenta à l'Académie des Sciences plusieurs résultats importans. Il remarqua d'abord que le fil conducteur d'une pile de Volta se chargeait de limaille de fer, comme le faisait l'aimant, et qu'elle s'en détachait aussitôt que la communication était interrompue. Cet effet ne devait pas être

attribué à une action électrique ordinaire, puisque l'expérience ne réussissait pas avec la limaille d'une substance non magnétique. De plus, il reconnut que le fil ne communiquait au fer qu'un magnétisme fugitif, tandis qu'il communiquait à l'acier un magnétisme durable; que l'aimantation était déterminée dans une direction perpendiculaire à la direction du courant; et que deux fils d'acier parallèles, formant un angle droit avec le fil conducteur et placés à des distances égales de part et d'autre de ce fil, acquerraient un même degré de magnétisme.

M. Arago, en plaçant une aiguille d'acier dans l'hélice formée avec un fil conducteur, qu'avait imaginée M. Ampère, obtint des aimans dont les pôles se renversaient si l'on répétait l'expérience en changeant la direction du courant. En introduisant un fil d'acier dans plusieurs hélices formées avec un même fil conducteur et tournées alternativement en sens contraire, il donna naissance à des points conséquens, tandis que placés hors des hélices, les fils d'acier s'aimantent à peine. M. Arago montra aussi que l'électricité ordinaire, passant par étincelles à travers les mêmes hélices, aimante également le fil d'acier. M. Ridolfi a reconnu depuis qu'un courant continu jouit de la même propriété. (*Voyez* le magnétisme.)

Septième fait. *De l'Action de la Terre sur les conducteurs voltaïques.*

425. Voici les différentes circonstances que cette attraction présente :

1°. Un courant vertical, mobile autour d'un axe vertical, est porté par l'action du globe à l'est de cet axe lors-

qu'il descend dans le conducteur mobile, et à l'ouest du même axe quand il va en montant; le plan qui dans la position d'équilibre passe par ce courant et par l'axe, est dans les deux cas perpendiculaire au méridien magnétique. Il résulte de cette expérience (et du n° 163) que, si l'action de la terre est due à des courans électriques, ils produisent les mêmes effets qu'un courant moyen dirigé dans le globe de l'est à l'ouest.

2°. Un conducteur horizontal qui ne peut se mouvoir que parallèlement à lui-même, est toujours jeté dans l'hémisphère boréal par l'action du globe à la gauche de l'observateur, qu'on suppose placé dans le courant de manière que ce courant aille de ses pieds à sa tête, et qu'il ait la face tournée vers le globe terrestre, quel que soit d'ailleurs l'azimut du courant. Si, par exemple, le courant est dirigé de l'est à l'ouest, on observe qu'il se porte au midi; et comme il est nécessairement attiré dans ce cas par le courant moyen équivalent à tous les courans terrestres, puisque ce courant va aussi de l'est à l'ouest, il s'ensuit que ce dernier est placé au midi du lieu où se fait l'expérience.

De même, si le conducteur mobile est placé de manière à ce que le courant soit dirigé du sud au nord, il va en s'éloignant du courant terrestre, placé au midi de l'Europe, par conséquent il est porté parallèlement à ce courant du côté où celui-ci se meut, c'est-à-dire de l'est à l'ouest, ou à la gauche de l'observateur.

Quand le conducteur est placé de manière que le courant qui le traverse va de l'ouest à l'est, il est repoussé par le courant terrestre au nord, à la gauche de l'observateur. Enfin, si le courant du conducteur va du nord au sud, il

va en s'approchant du courant terrestre, et tend par conséquent à rétrograder sur la direction de ce courant porté à l'est, c'est-à-dire encore à la gauche de l'observateur.

3°. Un conducteur horizontal mobile autour d'un axe vertical passant par une de ses extrémités, tourne par l'action de la terre, d'un mouvement continu qui a lieu dans cette direction, est, sud, ouest, nord, lorsqu'il va de la circonférence au centre, et en sens contraire quand il va du centre à la circonférence; il résulte encore de cette expérience et de ce que nous avons dit (n° 365) que le courant moyen est au sud du lieu de l'expérience.

Un conducteur mobile autour d'un axe vertical, et formant un circuit plan et presque fermé, prend, par l'action du globe, une situation telle que la partie où le courant est descendant se porte à l'est, et celle où il est ascendant à l'ouest. Si l'on forme une hélice avec un fil conducteur et que l'axe horizontal de cette hélice puisse tourner autour d'une ligne verticale passant par son milieu, chaque anneau de l'hélice se dirige comme le circuit dont nous venons de parler, et l'axe de cette hélice, qui est sensiblement perpendiculaire au plan de ses anneaux, se trouvera dirigé du nord au sud dans le plan du méridien magnétique, de manière que la partie de l'hélice où les courans descendent regardera l'est, et celles où ils montent l'ouest. Si l'on prend une autre hélice semblable à la première, on remarquera que les extrémités de même nom de ces deux hélices, c'est-à-dire celles qui se dirigent toutes deux vers le nord, ou toutes deux vers le sud, se repoussent mutuellement, tandis que l'extrémité nord d'une des hélices attire l'extrémité sud de l'autre. Il est aisé de voir que ce résultat est une conséquence nécessaire de l'action

mutuelle de deux courans électriques telle qu'elle a été établie précédemment. Cette action est en tout semblable à celle de deux aimans; et l'on observe en outre que si l'on remplace l'une des hélices par un aimant, l'action qui s'exercera entre lui et l'autre hélice sera encore la même.

Les expériences relatives à l'action du globe sur les conducteurs électriques, sont dues à M. Ampère.

Description d'un appareil à l'aide duquel toutes les expériences mentionnées dans les articles consacrés aux phénomènes électro-dynamiques peuvent être réalisées.

426. Pour réunir les avantages des appareils particuliers, il fallait d'abord rendre permanentes les parties de l'instrument destinées à effectuer des opérations communes à toutes les expériences, et ensuite appliquer successivement l'action de ces parties communes à des conducteurs mobiles dont chacun se rattachât isolément à l'appareil général. Tel est le but que M. Ampère s'est proposé d'atteindre dans l'instrument dont on donne ici la description d'après lui (*fig.* 246).

Dans les expériences d'électricité dynamique, une portion du circuit voltaïque rendue mobile est soumise à l'action d'un conducteur fixe, d'un aimant ou de la terre. Pour que le circuit ne soit pas interrompu, cette partie mobile doit être réunie à la masse des conducteurs par des coupes pleines de mercure, métal dont on se sert également pour réunir entre elles les parties de l'appareil que l'on ne peut pas lier et souder invariablement. Par la même raison, il est encore utile, chaque fois qu'on se sert de l'appareil, de nettoyer toutes les parties destinées à être

mises en contact; sans cette précaution, il pourrait arriver que le courant fût intercepté, et dès-lors toute action suspendue. Enfin, s'il est indispensable d'assurer la liberté des communications prévues, il est également important d'éviter celles qui pourraient accidentellement présenter au fluide une route autre que celle qu'il doit suivre. C'est pourquoi il est bon que la table *g h* (*fig.* 247) qui porte l'appareil soit revêtue d'un vernis isolant; et il faut éviter, avec le plus grand soin, d'y répandre de l'eau acidulée, et surtout se débarrasser du mercure qui y tombe dans le courant des expériences. Une ouverture pratiquée vers son milieu, et communiquant avec un tiroir, est destinée à cet objet.

Quant aux suspensions, elles sont établies par le moyen de petites coupes remplies de mercure, disposées selon le besoin des expériences. Les deux fils de la pile sont fixés à la table à l'aide d'une vis de pression pendant le cours des expériences, afin qu'on puisse faire plonger à volonté chacun d'eux, soit dans la rigole *A*, soit dans la rigole *a*. Enfin, il est indispensable que le démonstrateur puisse, par un mouvement prompt et facile, suspendre l'action électro-dynamique ou en changer le sens, en renversant la marche du courant, soit dans les conducteurs fixes, soit dans les conducteurs mobiles. Cette dernière condition s'obtient aisément au moyen de la disposition suivante:

En supposant celui qui opère placé en avant de la table de la pile et tourné vers elle, il aura à sa droite les fils (1) *R*, *r*, et devant lui, du même côté, deux bas-

(1) Qu'on a proposé d'appeler *réophores*.

cules *K* et *k* destinées à changer la direction du courant des conducteurs fixes et des conducteurs mobiles. Ces bascules, élevées d'environ un pouce au-dessus de la table, sont formées chacune par deux plaques de cuivre, isolées par un morceau de bois verni ou d'ivoire. Sur les bords latéraux de ces plaques on remarque huit appendices, dont quatre situées à droite plongent lorsque l'on incline de ce côté la bascule la plus rapprochée de l'opérateur dans les rigoles *A*, *B*, et dans les deux cavités *C*, *D* (*fig.* 247); les quatre autres appendices, lorsque cette bascule est inclinée à gauche, plongent dans les mêmes rigoles *A B*, et dans les cavités *C'*, *D'*; mais en la maintenant dans une position horizontale, toute communication métallique est rompue entre *A* et *B* et les cavités *C*, *D*, ou *C'*, *D'*. Celles-ci communiquent deux à deux, c'est-à-dire, *C* avec *C'*, et *D* avec *D'*, au moyen de lames de cuivre placées en sautoir sur la table, revêtues de soie et séparées l'une de l'autre par une pièce de bois verni. Les cavités *G* et *H* répondent à des lames de cuivre qui aboutissent l'une dans la cavité *C'*, et l'autre dans la cavité *D'* : elles sont donc aussi en communication, au moyen du sautoir, la première avec *C*, et la seconde avec *D*. Une seconde bascule *k*, placée un peu plus loin de l'opérateur, et toujours à sa droite, sert, suivant le sens dans lequel on l'incline, à établir ou à interrompre les communications entre les rigoles *B* et *a* et les cavités *c*, *d*, ou *c'*, *d'*. Celles-ci, réunies par couples à l'aide d'un sautoir semblable au premier, sont disposées de manière que *c* et *c'* communiquent à l'aide du ressort *I I'* placé sous la table, avec la coupe *S*, dont on règle la hauteur au moyen de la vis *z*, placée au-dessous de la table; elles communi-

quent aussi avec la colonne *E T*. De leur côté *d* et *d'* communiquent d'abord avec deux rigoles semi-circulaires *M N*, *m n*, qui contiennent du mercure dans lequel plongent les deux extrémités du fil *t u v* d'une boussole (1), et, par suite, avec la colonne *F U* et avec la cavité *O*.

Les colonnes *E T*, *F U* sont en cuivre et servent indistinctement, suivant la position de la bascule *k*, l'une à transporter le courant dans les conducteurs mobiles, et l'autre à le ramener. A cet effet, la colonne *E T* communique avec la coupe *X*, et *F U* avec la coupe *Y* isolée de la première par un tube de verre revêtu de gommelaque. *X* communique avec *x*, *x'* et *Y* avec *y* et *y'*. Chaque système de deux coupes *x* et *y* ou *x'* et *y'* fournit aux conducteurs mobiles une suspension verticale passant par le centre des coupes, et *x* avec *y'*, ou *x'* avec *y*, une suspension horizontale susceptible, par le moyen du bouton *Z*, d'être mis dans tous les azimuts.

Cela posé, voyons comment se font les expériences.

1°. *Pour les attractions et répulsions des courans angulaires.*

On place le conducteur rectangulaire *M N O P* (*fig.* 248) de manière que les quatre pointes *L L L L* du plateau qui le soutient entrent dans les points de repère indiqués sur la table par la même lettre *L*, et que les deux extrémités *G* et *H* plongent dans les cavités de même nom;

(1) Cette boussole est destinée à constater si le courant a lieu dans l'appareil, la boussole ainsi disposée a été appelée *galvanomètre*.

puis on suspend dans les coupes x et y le conducteur mobile (*fig.* 249) destiné aux actions angulaires. Alors, si R est le fil positif et que les deux bascules soient inclinées à droite, le courant passe de A à C, puis à C' et à G, parcourt le rectangle $M\,N\,O\,P$ dans le sens $M\,N$, revient dans la cavité H, et, transmis en $D'\,D\,B\,c'$, monte dans la colonne $E\,T$, arrive dans les coupes X et x, parcourt le conducteur mobile en suivant (*fig.* 249) la direction $x\,a\,b\,c\,d\,e\,f\,g\,h\,i\,y$, redescend par la colonne $U\,F$, traverse le galvanomètre $t\,u\,v$, et se rend dans la cavité d', puis dans la rigole a qui reçoit le fil négatif. La portion du courant électrique qui parcourt $d\,e$ étant dirigée dans le même sens que celle qui parcourt le côté $M\,N$ du conducteur fixe, il y aura attraction; et pour changer cette attraction en répulsion, il suffit d'incliner à gauche l'une ou l'autre des bascules K, k: la première renverse le courant du rectangle fixe, et la seconde celui du conducteur mobile; en sorte que, si on les inclinait à la fois du même côté, l'attraction subsisterait.

Cette remarque est importante, parce que c'est elle qui nous fournit un moyen pour ne pas confondre l'action de la terre avec celles qu'exercent les diverses parties de l'appareil. Les mouvemens auxquels celles-ci donnent naissance ne changent pas quand on renverse à la fois le courant dans les conducteurs fixes et mobiles, en faisant plonger dans la rigole a le fil placé d'abord dans la rigole A, et réciproquement, tandis que, dans les mêmes circonstances, l'action des courans du globe, dont la direction est constante, se manifeste en faisant changer le sens du mouvement des conducteurs mobiles.

Pour mettre cette distinction dans tout son jour, on

place le trépied (*fig.* 257), comme nous l'expliquerons plus bas, mais en relevant les extrémités *G H* du conducteur spiral, de manière qu'elles ne plongent pas dans les cavités *G* et *H* de la table (*fig.* 246). La communication entre les rigoles *A*, *B* étant établie par le conducteur *Q*, dont les appendices *e*, *f* plongent alors dans ces rigoles, on suspend alternativement les deux conducteurs mobiles (*fig.* 259 et 260) dans la coupe *S*, de manière que les couronnes de ces conducteurs soient plongées dans l'eau acidulée du vase (*fig.* 265), et on constate par l'expérience que le sens de la rotation du conducteur mobile (*fig.* 259), produite par l'action de la terre, change avec le sens du courant, soit par l'inversion des fils de la pile, soit par celle de la bascule *k* (*fig.* 247), tandis que la rotation du conducteur mobile (*fig.* 260) a toujours lieu dans le même sens, quel que soit celui du courant, parce qu'elle résulte de l'action mutuelle des courans de la couronne *a e d f* et de ceux de l'eau acidulée. On renverse alors le conducteur *Q* (*fig.* 246) pour interrompre la communication qu'il établissait entre les rigoles *A* et *B*, et l'on fait plonger dans les cavités *G*, *H* les extrémités du conducteur spiral (*fig.* 257) : aussitôt l'action de ce dernier conducteur sur le rayon *a c* (*fig.* 259 et 260) des conducteurs mobiles, imprime à ces conducteurs un mouvement de rotation beaucoup plus rapide et qui change de sens par l'inversion de l'une des deux bascules *K* ou *k* (*fig.* 246), mais qui n'en change point lorsqu'on renverse l'ordre de communication des fils de la pile, parce qu'alors la direction du courant se trouve changée à la fois dans les deux parties du circuit voltaïque qui agissent l'une sur l'autre, savoir : le rayon *a c* (*fig.* 259 et 260) et le conducteur spiral (*fig.* 257), dont nous venons de faire usage.

2°. *Conducteurs astatiques.*

Le conducteur mobile (*fig.* 248), et plusieurs autres conducteurs dont il sera bientôt question, sont *astatiques*, c'est-à-dire, qu'ils sont disposés de manière à ce que les actions du globe terrestre sur leurs diverses parties se détruisent mutuellement. Pour cela, on oblige le courant à suivre alternativement des directions opposées. Ainsi, dans le conducteur mobile (*fig.* 249), le mouvement de l'électricité ayant lieu dans le sens $x\,a\,b\,c\,d\,e\,f\,g\,h\,i\,y$, le courant est descendant dans la partie $c\,d$, et ascendant dans la partie $g\,h$; elles tendent donc avec des forces égales, l'une à se diriger vers l'est et l'autre vers l'ouest. De même aussi, l'action des courans horizontaux $d\,e$ et $h\,i$ est contrebalancée par l'action des courans opposés $b\,c$, $f\,g$. Quant aux parties $a\,b$ et $e\,f$, comme elles se trouvent dans l'axe de rotation, il est inutile d'y avoir égard. Quand ce conducteur mobile est suspendu aux coupes x', y', la pointe répond au milieu de la partie $M\,N$ du rectangle (*fig.* 248); on a alors action dans deux angles de suite : dans l'une elle est attractive, dans l'autre répulsive; l'effet produit est le même que dans la disposition précédente, mais l'intensité est sensiblement doublée. La branche p ne sert que comme contre-poids.

Le conducteur mobile (*fig.* 250) peut être alternativement placé dans les coupes x et y ou x' et y'. Dans le premier cas, le courant venant toujours par les coupes X et x, suit la route $x\,a\,b\,c\,d\,e\,f\,g\,h\,i\,y$: dès-lors, dans les fils $c\,d$ et $g\,h$, ce courant est encore dirigé vers le sommet de l'angle que ces deux fils forment avec le conducteur fixe; c'est pourquoi, si l'on place le conducteur mobile perpen-

diculairement au rectangle fixe, les deux portions *cd* et *hg* seront toutes deux attirées ou toutes deux repoussées, suivant le sens du courant du conducteur fixe. Dans le cas où il y a attraction, il en résulte un équilibre non stable; car si l'un de ces fils est accidentellement un peu plus rapproché que l'autre du conducteur fixe, il en sera plus fortement attiré et se portera vers lui. Si l'on change la direction du courant, dans l'un ou l'autre conducteur, l'attraction sera changée en répulsion, et le conducteur mobile se placera perpendiculairement au conducteur fixe. Ici l'équilibre est stable.

Lorsqu'on suspend le même conducteur dans les coupes *x'*, *y'*, le courant suit une direction opposée à la précédente, et parcourt le conducteur mobile dans la direction *yihgfedcba;* par conséquent, dans les fils *cd* et *gh*, il s'éloigne de la partie moyenne *dh*, en sorte que la répulsion d'une part et l'attraction de l'autre se font mutuellement équilibre : l'appareil reste immobile (*fig.* 250 *bis*).

Le conducteur (*fig.* 251), suspendu dans les coupes *x'*, *y'*, livre passage au fluide dans le sens *xabcdefghy;* si donc il coupe d'abord sous un angle quelconque le conducteur fixe *MN* (*fig.* 248), il tendra à se mouvoir jusqu'à ce que la branche *de* soit parallèle à *MN*, et que dans l'un et l'autre conducteur le courant soit dirigé dans le même sens. Aussi verra-t-on le conducteur mobile faire une demi-révolution si l'on change la direction de l'un des courans.

L'appareil (*fig.* 252) est destiné à faire voir que dans le conducteur (*fig.* 251), les branches *cd*, *ef* contribuent à l'effet produit, car il n'y a que les fils désignés par les mêmes lettres dans la figure 252, qui pouvant recevoir

quelque mouvement de la part du conducteur fixe, contribuent à mouvoir le conducteur mobile; les actions de ce conducteur, sur chacun des élémens des cercles horizontaux du conducteur mobile, passant par l'axe de rotation, ne peuvent en rien contribuer au mouvement de ce dernier; on voit cependant le mouvement se produire encore, à la vérité avec une force beaucoup moindre. Le même conducteur mobile (*fig.* 252) sert, en outre, ainsi que celui de la figure 258, pour les expériences relatives à l'action mutuelle de deux courans dont les directions forment constamment un angle droit.

3°. *Action de deux courans parallèles.*

Le conducteur (*fig.* 253) sert à mettre en évidence l'action qu'exercent l'un sur l'autre deux courans parallèles horizontaux. On place ce conducteur dans les coupes x, y'; le courant suit donc la direction $x\,a\,b\,y'$; or, $a\,b$ est parallèle à $M\,N$ et dans le même sens : il y aura donc attraction. Changez l'un ou l'autre courant, il y aura la répulsion.

Pour la même expérience sur des courans parallèles verticaux, on se sert de l'appareil (*fig.* 254), que l'on substitue au rectangle (*fig.* 248); les extrémités des fils G et H plongent dans les deux coupes G et H. Alors, si le courant arrive par H, il monte dans $m\,n$, descend dans $o\,p$, arrive dans la coupe G, et se porte ensuite dans le conducteur mobile (*fig.* 250) suspendu dans les coupes x, y. Le courant est descendant dans les branches $b\,c$, $f\,g$, ainsi que dans le fil $o\,p$: il y aura donc attraction. Dans cette disposition comme dans les précédentes, on change la direction du courant avec la bascule K, ou celle du courant mobile

avec la bascule *k*, et dans l'un et l'autre cas on voit la répulsion remplacer l'attraction.

L'égalité des actions attractives et répulsives que développent les courans horizontaux ou verticaux qui se meuvent dans le même sens ou dans des directions opposées, est mise en évidence au moyen du conducteur mobile (*fig.* 266) composé de deux fils garnis de soie, et qui servent, l'un à conduire et l'autre à ramener l'électricité, en sorte que, si le courant est descendant dans l'un, il est ascendant dans l'autre; il devra donc rester en repos, soit que l'on oppose sa branche verticale *c d* au fil *o p* du conducteur (*fig.* 254), ou sa partie horizontale *d e* au rectangle (*fig.* 248).

4°. *Conducteurs sinueux.*

Pour démontrer l'égalité d'action d'un conducteur rectiligne et d'un conducteur sinueux, on retourne le même appareil (*fig.* 254), de manière que les extrémités *G'* et *H'* des fils conducteurs plongent dans les coupes de même nom. Les choses étant ainsi disposées, si le courant entre par *H'* il monte par *r u*, descend par le conducteur sinueux *t v*, remonte par *p o*, et redescend par *n m*, passe de la cavité *G* (*fig.* 246) au conducteur mobile, est descendant dans la branche *b c* (*fig.* 250), ainsi que dans les tiges *n m* et *t v* (*fig.* 254), d'où résultera l'attraction de celles-ci pour *b c*. Ce fil resterait donc en repos s'il était également éloigné du conducteur sinueux *t v* et du fil *n m*; mais comme il est à peu près impossible d'établir cette parfaite égalité de distance, on voit le fil mobile *b c* se porter vers le conducteur fixe dont il est le plus voisin. Dans cette expérience, il vaut donc mieux avoir recours à la répul-

sion : ce que l'on fait en inclinant la bascule K à gauche : dès-lors le courant devient ascendant dans le conducteur fixe, tandis qu'il continue à être descendant dans le fil mobile, qui, par cela même, se place à égale distance de $v\,t$ et $m\,n$.

On peut faire la même expérience d'une autre manière, en opérant avec le conducteur mobile (*fig.* 267) précisément comme nous venons de dire qu'on opérait avec celui de la figure 267, et en constatant que les mêmes conducteurs fixes n'exercent aucune action sur lui, quoique des deux fils dont il se compose, un seul soit rectiligne et l'autre sinueux.

Le conducteur mobile (*fig.* 255) formé de deux cercles parcourus en sens contraires étant placé dans les deux coupes x, y, et soumis à l'influence qu'exerce le courant qui traverse le fil $o\,p$ (*fig.* 254), sera attiré ou repoussé suivant que le courant établi dans la portion du cercle qui est voisine de $o\,p$ aura lieu dans le même sens ou en sens contraire : ainsi, l'électricité arrivant dans la coupe H, descend par $o\,p$, parvient ensuite en x (*fig.* 255), et parcourt les deux cercles dans la direction $x\,a\,b\,c\,d\,e\,f\,g\,h\,y$. Il est donc facile, en les plaçant convenablement, d'obtenir à volonté l'attraction ou la répulsion.

5°. *Rotation continue déterminée par un conducteur fixe, par l'action de la terre, ou par celle des courans qui s'établissent dans l'eau acidulée où plongent les conducteurs mobiles.*

Pour toutes les expériences de rotation continue, on place les trois points O, t, l du trépied (*fig.* 257) dans la cavité et les points désignés par les mêmes lettres sur la

table; alors on pose sur ce trépied le vase de cuivre (*fig.* 256), dont le pied *J I* vient plonger dans la cavité *I* (*fig.* 257) qui communique par la lame de cuivre *I O* avec la cavité *O* (*fig.* 246). Ce vase est ensuite rempli d'eau acidulée, dans laquelle plonge la partie inférieure de tous les conducteurs mobiles destinés à ce genre d'expériences. Le courant ne passe plus alors dans les deux colonnes *E T*, *F U*, qui ne lui présentent aucune issue, parce qu'on a eu la précaution d'ôter les conducteurs mobiles : ainsi, après avoir parcouru le conducteur fixe, il arrive dans la rigole *B*, passe dans la cavité *c'*, en supposant la bascule *k* inclinée à droite, se rend dans la coupe *S*, parcourt le conducteur mobile qui y est suspendu, traverse l'eau acidulée du vase, le vase lui-même, et se rend au fil négatif par la colonne *O o d'*. Dans l'appareil qui vient d'être décrit, le mouvement est produit par l'action d'une spirale placée sur le bord du trépied, de manière à entourer le vase; on fait descendre le long des deux autres pieds du trépied les deux extrémités de la lame de cuivre qui forme la spirale, et on les fait plonger, l'une dans *G*, et l'autre dans *H*. Quand le mouvement doit être produit par un courant rectiligne tangent au vase, on emploie le rectangle (*fig.* 248) : on peut alors substituer au trépied armé d'une spirale un autre support tout pareil, mais qui en soit dépourvu, ou bien continuer à se servir du premier en ayant soin de relever les extrémités *G* et *H* (*fig.* 257) de la spirale, de manière qu'elles ne plongent plus dans les cavités correspondantes *G H* (*fig.* 246) : dans ce cas, ce sont les appendices *G*, *H* du rectangle (*fig.* 248) qu'il faut y faire plonger, en retournant ce rectangle et en plaçant les pointes *L*, *L*, *L*, *L* dans les points *L'*, *L'*, *L'*, *L'* (*fig.* 246).

Les conducteurs mobiles (*fig.* 258, 259, 260) qui doivent alternativement être placés dans la coupe *S*, diffèrent en ce que le premier a deux branches verticales, dont l'une, *c d*, est interrompue par une petite lame de bois *g d*, et dont l'autre, *a b*, fait communiquer la couronne *a e d f* avec la pointe *s*. Le second est privé de branches ascendantes, et la couronne *a e d f* ne communique avec la suspension que par le fil horizontal *a s*, une petite tige de bois verni *g d* interceptant la communication avec l'autre côté. Le troisième conducteur (*fig.* 260), disposé comme le précédent, en diffère en ce que la couronne est interrompue en *a* par une pièce d'ivoire *i* qui rompt la continuité des communications métalliques; il est même nécessaire, pour compléter la démonstration à laquelle sert cette dernière pièce, d'avoir un quatrième conducteur dans lequel la pièce d'ivoire, au lieu d'être placée entre *a* et *f*, soit située de l'autre côté, c'est-à-dire entre *a* et *e*.

Ces dispositions particulières à chacun des conducteurs mobiles que nous venons de décrire, déterminent la direction du mouvement de rotation qui se produit dans chaque cas, soit par l'action d'un conducteur rectiligne ou circulaire, soit par celle de la terre ou des courans qui traversent l'eau acidulée du vase (*fig.* 256).

En faisant agir sur les deux appareils (*fig.* 258 et 259) le courant spiral de la figure 257, ils tournent tous deux d'un mouvement de rotation continu, dont la vitesse, d'abord accélérée, devient ensuite constante; mais en soumettant les deux conducteurs à l'action du courant du rectangle (*fig.* 248), l'appareil (*fig.* 259) tournera encore d'un mouvement de rotation continu, dont la vitesse ne devient

jamais uniforme, mais éprouve des variations alternatives, suivant que le rayon *a s* se trouve, à chaque révolution, tantôt plus près, tantôt plus loin du rectangle. Quant à l'appareil de la figure 258, il ne tendra plus à tourner que par l'action de la terre, et celle du rectangle (*fig.* 248) tendra à l'amener dans une situation fixe, où le plan *a b c d* sera toujours parallèle au plan de ce rectangle, de manière que la branche *a b* soit du côté d'où vient le courant établi dans *M N* lorsque celui de *a b* est descendant et du côté opposé, quand ce dernier est ascendant. Dans l'appareil (*fig.* 260), l'effet produit est dû à l'action qu'exercent sur le courant de la couronne *f e a* les courans qui s'établissent dans l'eau acidulée que contient le vase (*fig.* 256). Enfin, en soumettant à la seule action de la terre l'appareil (*fig.* 259), on le voit tourner avec une vitesse constante; mais il n'en est pas de même de l'appareil (*fig.* 258); parce que, outre l'action que la terre exerce sur la branche *b s* pour la faire tourner uniformément, elle agit aussi sur la branche verticale *a b* pour l'amener dans une position fixe, à l'est quand ce courant est descendant, et à l'ouest quand il est ascendant.

Il est essentiel de remarquer que lorsqu'on veut laisser agir la terre ou les courans de l'eau acidulée, il faut faire communiquer les rigoles *A*, *B* (*fig.* 246) par le conducteur *Q* garni de deux appendices *e*, *f*, et mobile autour d'une charnière *q* attachée sur la table; alors le courant parcourt les conducteurs mobiles, soit en passant par les deux colonnes *E T* ou *F U*, soit en se rendant dans la coupe *S*, suivant que les conducteurs mobiles sont suspendus dans les coupes *x*, *y*, *x'*, *y'*, ou dans la coupe *S*.

6°. *Nullité d'action d'un courant circulaire sur un conducteur mobile qui ne peut que tourner autour de l'axe, passant par son centre, et qui est fermé ou qui a ses extrémités dans cet axe.*

Pour constater qu'un courant circulaire n'a aucune action sur un conducteur de forme quelconque, mobile autour d'un axe passant par le centre du courant circulaire et perpendiculaire à son plan, quand les deux extrémités du conducteur mobile se trouvent dans cet axe, on se sert du conducteur spiral (*fig.* 257), dont les courans sont sensiblement circulaires; on place le trépied qui le supporte comme dans les expériences sur le mouvement de rotation continue, après en avoir ôté le vase de cuivre (*fig.* 256); le centre de ces courans se trouvant alors dans la verticale qui passe par ces deux coupes x', y', si l'on suspend dans ces coupes l'un des conducteurs mobiles (*fig.* 249, 250, 251), on remarque qu'il n'y a point d'action exercée par le conducteur spiral quand cette condition est exactement remplie.

7°. *Direction imprimée par la terre.*

Le cercle (*fig.* 261) se place dans les coupes x, y, ou x', y'; et comme il doit être soumis à l'action de la terre, le conducteur recourbé Q (*fig.* 246) met alors en communication les rigoles A et B, en sorte que le courant ne peut s'établir que dans le conducteur mobile, dont la position, toujours perpendiculaire au méridien magnétique, est telle que la partie dans laquelle le courant est ascendant se dirige vers l'ouest, et celle où il est descen-

dant vers l'est. Aussi voit-on, en changeant la direction du courant établi, le cercle faire une demi-révolution.

Les mouvemens du cercle (*fig.* 261) sont, dans certaines dispositions, gênés par le mode de suspension; mais on peut remédier à cet inconvénient en remplaçant le cercle (*fig.* 261) par le conducteur mobile (*fig.* 262). L'anneau *a b* donne passage au support de la coupe *S* dans laquelle plonge la pointe sur laquelle doit tourner ce conducteur. La petite coupe *d*, opposée à la pointe *S*, contient du mercure où plonge un fil de cuivre *d e* attaché, à l'aide de la pince *b*, au support *Y i y'* de la coupe *y'* (*fig.* 246), qui communique avec la colonne *F U*, et dans laquelle on fait plonger l'extrémité *c* du fil *c d* afin de compléter le circuit. Ce nouveau mode de suspension permet au cercle de tourner dans tous les sens; et en inclinant à propos la bascule *k*, on pourra même lui imprimer un mouvement de rotation continue.

Le conducteur (*fig.* 263) se suspend comme le cercle de la figure 262. L'action de la terre sur les deux branches *a b* et *c d* se détruisant, l'on observe uniquement l'effet produit sur la branche *b c*, qui se porte à l'ouest ou à l'est, suivant que le courant *y* est ascendant ou descendant.

On observe encore l'action de la terre sur la branche horizontale *a b* du conducteur (*fig.* 253), parce que dans les deux branches verticales les courans sont opposés entre eux; mais il est essentiel d'observer que l'action ne se manifeste qu'à l'instant où l'on complète le circuit, et qu'il faut avoir soin de mettre ce conducteur dans un plan sensiblement vertical au moyen du contre-poids *i*. Dans cette expérience la branche *a b* est toujours portée à gauche du courant avec la même force, dans quelque azimut qu'on

ait placé l'appareil, résultat conforme à ce que donne le calcul.

8°. *Hélices et aimans.*

Les figures 264 et 265 représentent des hélices avec lesquels on peut imiter les aimans : le premier se fixe à la table (*fig.* 246), au moyen de la pince *b*, de manière que ses deux appendices *G*, *H* (*fig.* 264) plongent dans les cavités de même nom de la fig. 246; et le second (*fig.* 265) est suspendu dans les coupes x, y, ou x', y'; le courant s'établit donc dans celui de la figure 264 comme il le ferait dans un autre conducteur fixe, et dans celui de la figure 265 comme il s'établirait dans un autre conducteur mobile : or, en présentant l'une des extrémités du premier à l'une des extrémités du second, il y a attraction quand les extrémités en regard sont, l'une à droite et l'autre à gauche, des courans que parcourent les fils dont ces hélices sont formées; et il y a au contraire répulsion lorsque les deux extrémités des mêmes hélices que l'on fait agir l'une sur l'autre, sont situées du même côté de leurs courans respectifs, le tout conformément aux résultats des calculs fondés sur la formule de M. Ampère (Précis de la Théorie des phénomènes électro-dynamiques, par M. Ampère, ou Mémoire de M. Savary sur l'Application du calcul aux mêmes phénomènes). En observant l'action de la terre sur l'hélice (*fig.* 265), on voit que l'extrémité qui est à gauche de ses courans se dirige constamment au nord, parce que c'est dans cette situation de l'hélice que les courans ascendans de ce cylindre sont du côté de l'ouest, et les courans descendans du côté de l'est.

Si l'on remplace l'une ou l'autre des hélices par un aimant, on verra l'aimant se conduire comme une hélice.

Enfin, on peut encore vérifier qu'une hélice se conduit à l'égard d'un fil conducteur, comme M. OErsted a découvert que le faisait un aimant : pour s'en assurer, il faut placer le conducteur rectangulaire redoublé (*fig.* 248) comme dans la première expérience destinée à constater son action sur un conducteur rectiligne, et suspendre immédiatement au-dessus du milieu de la portion *M N* de ce conducteur, l'hélice (*fig.* 265), en mettant les pointes x, y dans les coupes y', x' (*fig.* 246) : quelque direction qu'ait l'hélice, on la verra, à l'instant où l'on établira les communications avec la pile, prendre une direction perpendiculaire à celle du courant *M N* (*fig.* 248), de manière que l'extrémité de l'hélice qui est à gauche de ses courans, se porte du même côté de *M N* que le ferait le pôle austral d'un aimant dans l'expérience de M. OErsted.

Il est important, dans toutes les expériences que nous venons de décrire, d'avoir soin d'interrompre le courant électrique dans les conducteurs mobiles, toutes les fois qu'on veut plonger les pointes de ces conducteurs dans les coupes, ou les en retirer : cette précaution est indispensable pour éviter la combustion ou la fusion des pointes. Il est aussi nécessaire, avant de commencer ces expériences, de s'assurer que le courant passe effectivement et par le conducteur fixe et par le conducteur mobile ; ce qu'on reconnaît aisément à l'aide du galvanomètre.

Nous avons exposé les principaux faits des phénomènes électro-dynamiques, et les moyens de les constater par l'expérience. *Voyez* les additions pour quelques points de théorie.

Du Multiplicateur.

427. M. Schweiger, de Halle, a imaginé un appareil

propre à mettre en évidence, à l'aide de l'aiguille aimantée, l'existence des courans électriques les plus faibles. La théorie du multiplicateur est fondée sur l'égalité d'action de toutes les parties d'un fil conducteur. Si, par exemple, une aiguille aimantée est placée entre deux portions *a b* et *b c* d'un fil semblable (*fig.* 245, pl. 10), et que les fils et l'aiguille soient dans un même plan vertical, on conçoit que l'aiguille doit recevoir une impulsion double de celle qu'un seul fil lui imprimerait. En effet, les deux impulsions données à l'aiguille par les deux portions horizontales du fil s'ajoutent entre elles, puisqu'elles sont parcourues par le courant électrique, en deux sens différens. On augmentera donc encore l'effet en faisant faire au fil conducteur plusieurs circonvolutions, comme on le voit (*figure* 245 *bis*). C'est là ce qui constitue le multiplicateur de M. Schweiger.

La fig. 245 *ter* représente cet appareil tel qu'il a été décrit par M. OErsted. *A A* est le pied de l'instrument; *C C*, *C' C'* sont deux montans qui portent un châssis *B B*, dans le bord duquel existe une rainure où se logent les tours successifs du fil multiplicateur. *D D* est un montant destiné à porter le fil auquel l'aimant doit être suspendu. Toutes ces parties sont en bois. *E E* est un fil de métal qui passe à frottement par un trou pratiqué dans la partie supérieure du montant *D D*. A ce fil métallique s'attache par un peu de cire le fil de cocon *E F*, qui porte à son extrémité un petit triangle double de papier, sur lequel repose l'aiguille aimantée. Le fil de suspension passe à travers un cylindre, ce qui empêche le fil multiplicateur de le toucher.

On voit encore, au-dessous de l'aiguille aimantée, un

cercle *R* divisé, sur lequel se mesurent les déviations. Le fil multiplicateur est de cuivre argenté; son épaisseur est d'un quart de millimètre. *Il est enveloppé dans toute sa longueur de fil de soie :* par là on empêche toute communication électrique entre les différentes parties de ce fil qui sont superposées dans la rainure du châssis *BB*. *H* et *J* représentent les deux extrémités du fil.

L'usage de cet appareil se conçoit presque sans explication. Pour multiplier l'action qu'a sur l'aiguille un courant galvanique, on n'a qu'à établir les communications de manière que le fil multiplicateur devienne une partie du circuit. L'électricité développée par le contact de deux disques, l'un de zinc et l'autre de cuivre, quand même on n'emploie que de l'eau pure pour conducteur liquide, est déjà très-appréciable avec cet appareil. On peut de la même manière rendre sensibles des actions galvaniques qui seraient trop faibles pour être aperçues au moyen d'une grenouille préparée.

Lorsqu'on veut se servir du multiplicateur pour des actions électro-motrices un peu considérables, il faut employer des fils conducteurs épais, afin que leur température ne s'élève pas au point d'altérer la soie, et même de les brûler.

Nous avons vu précédemment le parti avantageux qu'on a tiré de la grande sensibilité du multiplicateur, pour reconnaître l'électricité dans des phénomènes où sa présence avait échappé à des observateurs attentifs, mais pri[illegible] un pareil secours.

Des poissons électriques.

[illegible]ssons ont la faculté de produire des

effets tout-à-fait analogues aux effets des décharges électriques. On en connaît aujourd'hui plusieurs espèces.

De ce que les gymnotes et les poissons électriques sont pourvus d'un organe formé de cellules disposées de la même manière que les plaques métalliques dans une pile, on a considéré cet organe comme la source de la puissance électrique de ces animaux.

Les effets des poissons électriques sont incontestables : nous citerons ceux dont M. de Humboldt a été témoin. Consacré pendant son séjour dans l'Inde, à enrichir toutes les parties de l'histoire naturelle, il a fait aussi quelques essais sur les gymnotes. Ayant fait mettre des chevaux sauvages dans un ruisseau qui contenait beaucoup de ces poissons, il les a vus, nageant à la surface de l'eau, se presser sous le ventre des chevaux, et les faire succomber par la violence des coups invisibles qu'ils leur portaient.

« On ne s'expose pas impunément, dit M. de Humboldt, aux premières commotions d'un gymnote très-grand et fortement irrité. Si, par hasard, on reçoit un coup avant que le poisson soit blessé ou fatigué, la douleur et l'engourdissement sont si violens, qu'il est impossible de prononcer sur la nature du sentiment que l'on éprouve. Je ne me souviens pas d'avoir jamais reçu, par la décharge d'une grande bouteille de Leyde, une commotion plus effrayante que celle que j'ai ressentie, en plaçant imprudemment les deux pieds sur un gymnote qu'on venait de retirer de l'eau. Je fus affecté le reste du jour d'une vive douleur dans les genoux et presque dans toutes les jointures. » La sensation que causent les faibles commotions d'un gymnote, a paru à M. de Humboldt analogue au tressaillement dont il a été saisi, par l'application d'une dou-

ble lame de zinc et de cuivre, sur des plaies qu'il s'était faites au dos, par le moyen des cantharides. La différence des sensations, entre les effets des poissons électriques, et ceux de la pile ou d'une bouteille de Leyde, faiblement chargée, a frappé tous les observateurs. Elle n'est cependant pas contraire à l'identité de l'électricité et de l'action galvanique des poissons. L'électricité peut être la même, mais les effets seront diversement modifiés, par la disposition des appareils électriques, par l'intensité du fluide, par la rapidité du courant, par un mode d'action particulier.

D'après ce qui précède, on ne sera pas étonné si l'on a employé jadis les gymnotes pour la guérison des paralytiques.

Les gymnotes ne sont ni des conducteurs, ni des batteries, ni des appareils électro-moteurs, dont on reçoit la commotion chaque fois qu'on les touche convenablement. L'action électrique du poisson dépend uniquement de sa volonté. On tente souvent, isolé ou non isolé, de toucher le poisson, sans éprouver la moindre commotion; il dépend même de l'animal de n'agir que vers le point dans lequel il se croit le plus fortement irrité.

D'après Galvani, des grenouilles préparées et placées immédiatement sur le corps d'une torpille, éprouvent de fortes contractions, à chaque décharge.

L'action du poisson, sur les organes de l'homme, est transmise et interceptée par les mêmes corps qui transmettent et interceptent le courant électrique d'une bouteille de Leyde ou d'une pile de Volta.

On n'a jamais vu la plus petite étincelle sortir de l'animal. Irrités dans l'obscurité, ils ne répandent pas la

plus faible lumière, comme MM. de Humboldt et Bonpland l'ont constaté.

L'électroscope le plus sensible n'est pas affecté par la décharge d'un gymnote. Il n'est pas vrai, comme l'avait annoncé le docteur Schilling, que les gymnotes aient de l'action, soit sur les aimans, soit sur la limaille de fer.

Le docteur Bancroff paraît être le premier qui ait soupçonné de l'analogie entre les phénomènes des poissons électriques, et ceux que produit l'électricité. Walsh, dans le but de vérifier cette conjecture, fit plusieurs expériences; il parvint à faire ressentir la commotion à un certain nombre de personnes, mais il n'obtint ni étincelles, ni attractions électriques.

M. de Humboldt qui, comme nous l'avons vu, a fait des expériences multipliées sur des gymnotes de grandes dimensions (trois pieds onze pouces), n'a pas obtenu de signes d'électricité, même dans l'électromètre condensateur.

Nous ajouterons encore ici un fait observé par M. Gay-Lussac, et qui est bien singulier, s'il ne tient pas à la faiblesse de l'animal; c'est que lorsqu'une personne isolée touche une torpille, il faut que le contact soit immédiat, pour qu'elle éprouve une commotion : ainsi on la touche impunément avec une clef.

Voyez, pour plus de développemens, le tom. 2 de la Relation historique du Voyage de M. de Humboldt. Vous y trouverez aussi que ce savant célèbre construisait des piles avec des organes animaux et des plaques métalliques, avant qu'on connût l'instrument de Volta.

DE L'OPTIQUE.

429. L'optique est une des branches les plus importantes de la physique; elle fournit à l'astronomie, à la navigation, et à l'histoire naturelle, des instrumens précieux sans lesquels ces sciences, si riches en faits, seraient encore dans l'enfance. La connaissance des propriétés de la lumière permet d'expliquer un grand nombre de phénomènes naturels souvent reproduits : par exemple, l'arc-en-ciel, le crépuscule, l'aberration des étoiles, etc. Avant d'entrer dans la théorie et la construction des instrumens d'optique, avant de chercher à expliquer les phénomènes dans lesquels la lumière joue le principal rôle, nous indiquerons ses propriétés les plus remarquables.

PROPRIÉTÉS DE LA LUMIÈRE.

1°. *Transmission.*

La transmission de la lumière se fait en ligne droite; pour le démontrer d'une manière expérimentale, pratiquez une petite ouverture au volet d'une chambre obscure; la lumière en pénétrant dans la chambre éclairera tous les corps qui seront sur son passage et donnera naissance à une trace brillante rectiligne. Tout le monde sait que, lorsque sur la ligne droite qui joint un objet et l'œil, on place un corps opaque, l'objet cesse d'être aperçu.

2°. *Vitesse.*

La vitesse de la lumière est prodigieuse; Galilée est le premier qui ait cherché à la mesurer; mais ses recherches furent sans succès, parce qu'il faisait parcourir à la lumière un intervalle trop peu étendu. Les observations astronomiques offrent des moyens de la mesurer avec une grande précision. La première application en fut faite par Roemer et Cassini dans le mouvement du premier satellite de Jupiter. Cette planète est accompagnée de quatre satellites; elle projette dans l'espace une ombre conique, dont la base repose sur sa partie éclairée; le premier satellite s'éclipse par son entrée dans le cône d'ombre : si un observateur est placé sur la terre entre Jupiter et le soleil, il reconnaît qu'il s'écoule 42 h $\frac{1}{2}$ entre deux éclipses successives; mais comme le mouvement de la terre autour du soleil est beaucoup plus rapide que celui de Jupiter, bientôt le soleil, la terre et Jupiter ne sont plus en ligne droite.

Dans une position très-éloignée de la première, l'observateur devrait voir sortir le satellite du cône d'ombre, au bout d'un certain nombre de fois 42 h $\frac{1}{2}$, si la vitesse de la lumière était infinie : mais il n'en est pas ainsi et le satellite est d'autant plus en retard que l'accroissement de la distance est devenu plus grand. Si la terre est à l'extrémité du diamètre de son orbite, le retard est de 16′ 26″. Ce diamètre est de 68 à 69 millions de lieues; la lumière a donc une vitesse de 70,000 lieues par seconde; elle nous vient conséquemment du soleil en 8′ 13″.

Cette vitesse est constante; c'est-à-dire que, quelle que soit la distance de la terre à Jupiter, on trouve tou-

jours 70,000 lieues pour l'espace parcouru dans une seconde.

Déjà la connaissance de la vitesse de la lumière nous apprend que les astres ne sont vus qu'un certain temps après leur apparition sur l'horizon.

3°. *Ombre.*

Quand un corps opaque est en présence d'un corps lumineux, il ne peut jamais être éclairé en totalité; l'ombre est modifiée par les dimensions, la forme, la position du corps lumineux et du corps opaque. L'on donne le nom d'ombre pure à la portion de l'espace privée de lumière.

Le passage entre la partie obscure et la partie parfaitement éclairée ne se fait pas d'une manière tranchée. La portion de l'espace qui ne reçoit qu'une partie de la lumière est appelée *pénombre*.

4°. *Décroissement de l'intensité.*

L'intensité de la lumière décroît comme le carré de la distance; pour concevoir cette loi de décroissement, placez un point lumineux au centre de deux sphères concentriques, et dont le rayon de la plus grande soit double du rayon de la plus petite. Recevez d'abord la lumière sur la surface de la plus petite sphère; supposez-la ensuite reçue dans la sphère du rayon double; la même quantité de lumière sera répandue sur une surface quatre fois plus grande, son intensité sera donc quatre fois plus petite.

5°. *Influence de l'inclinaison de la surface.*

L'intensité de la lumière dépend encore de l'inclinaison de la surface par rapport à la direction des rayons. Ainsi les surfaces *B E* et *C B* (*fig.* 268) seront vues du

point H avec la même intensité de lumière; cependant l'étendue de la surface BC est plus grande que celle de la surface BE, et la ligne BC étant à la ligne BE comme 1 est à sin BCE, il faut que l'intensité de la lumière lancée par BC dans la direction CL ou DH soit dans un rapport inverse, puisque les deux surfaces BE et BC, vues dans cette direction, sont également lumineuses.

Il est donc démontré que l'intensité de la lumière émise par une surface dans une direction donnée, est proportionnelle au sinus de l'angle formé par la surface et la direction des rayons.

6°. *Passage à travers les milieux diaphanes.*

Outre ces deux causes d'affaiblissement dans l'intensité de la lumière (4° et 5°), il en existe une troisième qui est le passage à travers les milieux diaphanes. Ainsi la lumière des objets vus à une grande distance dans l'air, est peu vive (1). L'effet de l'absorption se fait beaucoup plus sentir dans les milieux solides ou liquides. Le cristal le plus pur paraît opaque si on le prend sous une épaisseur de quelques pouces. Le fond des mers profondes est complètement privé de lumière (2).

7°. *Comparaison des intensités de deux lumières.*

On compare les intensités de deux lumières par plusieurs procédés; les deux suivans sont surtout employés.

---

(1) D'après Bouguer, un intervalle de 3 lieues ½ diminue d'un tiers l'intensité d'une lumière.

(2) L'intensité d'une lumière décroît en progression géométrique par son passage à travers un milieu d'une densité uniforme, et dont l'épaisseur croît en progression arithmétique. (*Voyez* Bouguer et Lacaille.)

[redacted]

Le premier [illegible] l'œil, et à [illegible] sont placées. On [illegible] deux [illegible] ceau de papier [illegible] vertures et les [illegible]

On se place [illegible] proche les [illegible] chaque [illegible]

mières : [illegible]

d'où $\frac{J}{J} = \frac{D^2}{D^2}$ [illegible]

est égal [illegible] rapport [illegible] l'optique de [illegible]

Rumford [illegible] cer à des [illegible] corps [illegible] transparent. [illegible] les deux [illegible] égales. On [illegible] me dans [illegible] que l'égalité [illegible] justesse que [illegible]

Nous verrons [illegible] cédé.

[illegible]

450. Le soleil et les [illegible] Les autres corps ne le [illegible]

çoivent du soleil, ou parce qu'ils sont portés à une température élevée; tous les corps en général peuvent devenir lumineux, et conséquemment visibles dans l'obscurité quand ils sont chauffés jusqu'à 500 degrés environ.

La lumière, soit qu'elle se réfléchisse à la surface des corps, soit qu'elle pénètre dans leur intérieur, qu'elle passe seulement dans leur voisinage, subit des modifications que nous examinerons aux articles *Réflexion*, *Réfraction*, *Dispersion*, *Diffraction*.

431. On a imaginé deux hypothèses pour expliquer les phénomènes lumineux.

Les uns supposent, avec Newton, que les corps lumineux émettent dans tous les sens des particules, d'une ténuité extrême, qui jouissent de toutes les propriétés générales qui viennent d'être énoncées.

Les autres admettent l'hypothèse de Descartes. Cette hypothèse consiste à supposer que l'impression d'un corps lumineux se transmet à l'œil par une suite d'ondulations, imprimées par le corps lumineux à l'*éther*, fluide répandu dans tout l'univers; nous reviendrons sur ce sujet à la fin de l'optique; nous allons faire, dans l'hypothèse de l'émission, l'histoire des principaux phénomènes que nous avons à considérer dans cette partie de la physique.

Réflexion de la lumière (1).

432. On dit qu'un rayon de lumière se réfléchit quand, après la rencontre d'une surface, il se replie vers le milieu

(1) *Voyez* à la fin de l'ouvrage, les explications de la réflexion, et dans la théorie de l'émission et dans la théorie des ondes.

qu'il avait déjà traversé. On appelle angle d'incidence l'angle formé par la première direction du rayon lumineux avec la surface, et angle de réflexion, celui que forme le rayon réfléchi avec la même surface : l'expérience prouve que ces deux angles sont égaux et placés dans un même plan perpendiculaire à la surface de réflexion. Parmi les différentes manières de constater la vérité de cette proposition, la suivante est la plus simple.

Soit *A B C O* (*fig.* 269) un cercle gradué; *S O* un rayon de lumière, tombant sur le plan *A O B* d'un miroir. Le cercle étant perpendiculaire à ce plan et le rayon *S O* étant parallèle au cercle. Soit *O H* le rayon réfléchi; si l'on dispose au point *O* et dans le plan du rayon incident un tuyau d'un petit diamètre et couvert de noir de fumée dans son intérieur (le noir a pour objet d'éteindre toute la lumière qui tomberait sur les parois intérieures et qui s'écarterait de l'axe du tuyau), on reconnaîtra qu'il n'est possible de voir le point lumineux *S* que dans le cas où le tuyau *O H* placé dans le plan *S O C* fait un angle *B O H* égal à l'angle *S O A*.

L'égalité des angles *S O C* et *H O C* est une conséquence de l'égalité des angles *S O A* et *H O B* dont ils sont les complémens. Souvent on substitue ces derniers angles aux premiers. La connaissance de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion nous permettra d'exposer les différentes circonstances présentées par la réflexion de la lumière sur le miroir plan et sur les miroirs courbes.

Une certaine quantité de lumière est absorbée par le miroir (1); mais quelle que soit la perte, le faisceau ré-

(1) Quoiqu'on ait élevé des doutes sur l'exactitude des tables de Bou-

fléchi suit toujours la loi de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion.

Miroir plan.

453. Un point lumineux *B* (*fig.* 271), placé devant un miroir *A B*, enverra des rayons dans toutes les directions; parmi ces rayons, quelques-uns, après leur réflexion en *a b*, entreront dans l'œil d'un observateur placé en *p t*; l'ensemble de ces derniers rayons peut être considéré comme

---

gner, elles suffisent pour donner une idée du phénomène. La table suivante indique la quantité de lumière réfléchie sous différens angles. On suppose 1000 rayons incidens.

Angles d'incidence.	Rayons réfléchis.	
	Eau.	Verre.
5°	501	549
10	533	412
15	211	209
50	22	54
70	18	25
90	18	25

Mercure et miroir de métal poli.

11° $\frac{1}{2}$	754

Lambert avait reconnu, en exposant une lame diaphane à faces parallèles à l'action de la lumière, fig. 270, que la seconde face réfléchissait sous le même angle plus de lumière que la première. M. Arago a vu depuis que les sinus des angles sous lesquels la première et la deuxième faces réfléchissent la même proportion de lumière, sont comme les sinus des angles d'incidence et de réfraction. Ainsi, supposons qu'un rayon de lumière *J S* tombant sur la première face *C D*, il se réfléchisse $\frac{1}{10}$, par exemple, de toute la lumière incidente; il se réfléchirait aussi $\frac{1}{10}$ du rayon réfracté, qui tombe sur la deuxième face *A B*, s'il n'était pas modifié par la polarisation. (*Voyez* la Polarisation.) M. Poisson a démontré que ce résultat est une conséquence de la théorie des ondes.

un cône tronqué, dont le cercle *p l* forme la grande base, et dont la petite base repose sur le miroir. Le miroir plan a changé la direction du faisceau sans altérer la disposition relative des différens rayons qui le composent. Le cône *l p R'* sera égal au cône brisé *l p R*; l'observateur ayant l'habitude de trouver les objets dans la direction des rayons lumineux qu'il reçoit dans l'œil, croira voir l'objet en *R'*. Les deux triangles *R D a* et *R' D a* ayant un angle égal, compris entre des côtés égaux, sont égaux. *D R'* est donc égal à *D R*. Ainsi l'objet est vu derrière le miroir à une distance *D R'* égale à la distance *D R*.

On aura l'image d'un objet *F K*, d'une dimension donnée, en menant de chaque point de cet objet une perpendiculaire au miroir, et en la prolongeant hors du miroir d'une quantité égale à la distance du même point au miroir (*fig.* 272).

On peut remarquer que les objets sont vus dans le miroir plan avec la même grandeur, la même forme ; seulement l'image est moins brillante que l'objet, parce que le miroir éteint toujours une certaine quantité de lumière.

Si l'on déplace l'objet, on voit l'image se déplacer en sens opposé de la même quantité; si c'est au contraire le miroir qui se meut, le mouvement de l'image sera double; ces effets sont une conséquence de ce que l'image et l'objet sont également distans du miroir. Voilà pourquoi un objet vertical placé devant un miroir également vertical, paraît horizontal, si le miroir prend l'inclinaison de 45°.

Miroirs courbes.

434. On n'emploie en général que des miroirs de forme

sphérique, parce que le travail des autres miroirs présente trop de difficultés. Une surface courbe étant un assemblage d'une infinité de surfaces planes, les considérations précédentes auxquelles a donné lieu le miroir plan, vont nous servir dans nos recherches sur les miroirs concaves et convexes.

Supposons d'abord un simple rayon lumineux *m O* (*fig.* 273) parallèle à l'axe *A C* et tombant en *m* sur le miroir sphérique, il se réfléchira sur le petit élément de la surface sphérique comme sur un plan, en faisant l'angle de réflexion *F m C* égal à l'angle d'incidence *C m O* et en restant dans le plan de la normale *C m* et du rayon incident. Pour trouver le point *F* d'intersection du rayon réfléchi et de l'axe, il faudra remarquer que les angles *F m C* et *C m O* sont égaux comme angles de réflexion et d'incidence; que les deux angles *F C m* et *C m O* le sont comme alternes internes; les angles *m* et *C* du triangle *m C F* sont donc aussi égaux; *F m* est donc égal à *F C*. Mais comme l'arc *A m* est toujours une très-petite portion du cercle, les lignes *A F*, et *F m* approchent beaucoup de l'égalité; le point *F* est donc à-peu-près sur le milieu du rayon *A C*. Ce que nous avons dit d'un seul rayon, et d'une seule section du miroir, pourrait être répété pour tout un faisceau lumineux, et pour toute la surface du miroir; le point *F*, lieu de la réunion de tous les rayons parallèles à l'axe *A C*, est appelé *foyer principal*, et *A F*, la distance *focale principale*.

435. Supposons maintenant le point lumineux placé en *P*, sur l'axe au-delà du centre. L'inspection de la figure 274, montre que l'angle d'incidence *P m C* est plus petit que dans le cas du parallélisme, l'angle de réflexion sera

aussi plus petit ; *le foyer conjugué* sera donc entre le foyer principal et le centre. La comparaison de la valeur de l'angle d'incidence dans le triangle $P\,m\,C$ et de l'angle de réflexion dans le triangle $P'\,m\,C$ conduit à $2\,A\,C\,m = A\,P'\,m + C\,P\,m$. Substituant à ces angles, toujours très-petits, leurs tangentes, on a $\frac{2\,A'\,m}{A'\,C} = \frac{A'\,m}{A'\,P'} + \frac{A'\,m}{A'\,P}$ ou bien, $A\,A'$ étant sensiblement nul, vu la petitesse de l'arc $A\,m'$, $\frac{2\,A'\,m}{A\,C} = \frac{A'\,m}{A\,P'} + \frac{A'\,m}{A'\,P}$, en divisant tout par $A'\,m$, on a enfin $\frac{2}{A\,C} = \frac{1}{A\,P'} + \frac{1}{A\,P}$, relation qui fera connaître la position du foyer conjugué P', quand le rayon $A\,C$ de la sphère, et la distance $A\,P$ seront donnés. Si dans cette formule on supposait $A\,P$ infini, on retomberait sur la valeur de la distance focale principale que nous avons déterminée directement.

Si le point lumineux était en P', le même calcul donnerait la valeur de $A\,P$. On voit aussi que si la lumière partait du centre, elle y serait renvoyée par réflexion.

436. Il ne reste qu'une position à donner au point lumineux, pour que nous ayons examiné tous les cas : il n'y a plus qu'à placer ce point entre le miroir et le foyer principal (*fig.* 275). L'angle d'incidence $P\,m\,C$ est plus grand que l'angle $F\,m\,C$, or, un rayon incident $F\,m$ donnerait un rayon parallèle à l'axe, donc le rayon réfléchi, $m\,D$ correspondant au rayon incident $P\,m$, doit s'en écarter davantage ; il ne coupera l'axe que par son prolongement $m\,P'$ dans un sens opposé à celui de sa direction. Un calcul tout-à-fait semblable à celui du n° 435, appliqué aux angles d'incidence $P\,m\,C$ et de réflexion $C\,m\,D$ (la

valeur du premier étant prise dans le triangle $P\,m\,C$ et celle du second dans le triangle $C\,m\,P'$), conduisent à la relation $\frac{2}{AC} = \frac{1}{AP} - \frac{1}{AP'}$.

Cette relation est la même que celle du n° 435 au signe près de AP'; d'où il faut conclure que la formule $\frac{2}{AC} = \frac{1}{AP} + \frac{1}{AP'}$ convient aux miroirs concaves et aux miroirs convexes, pourvu qu'on donne le signe plus aux lignes AP et AP' dans la concavité, et le signe moins dans la convexité. On représente ordinairement les lignes AC, AP, et AP' par r, p, p', en sorte que la formule générale s'écrit $\frac{2}{r} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$; sous cette forme elle est plus facile à retenir.

437. Si le point était placé hors de l'axe (*fig.* 276), on trouverait son foyer conjugué en menant une ligne PC par le centre qui deviendrait l'axe par rapport au point P, et tout rentrerait dans le n° 435, parce qu'on n'aurait à faire sur l'axe PCD, que ce qui a été fait quand le point était sur l'axe PCA.

438. Rien n'est plus facile que d'avoir l'image d'un objet; il suffit de répéter pour chaque point de cet objet, la construction précédente, *fig.* 277: l'image est renversée. La similitude des triangles $H'PC$ et PHC donne la proportion $P'H' : PH :: PC : PC$, d'où l'on peut déduire la grandeur $P'H'$ de l'image. L'inspection de la figure montre que l'image d'un objet placé au-delà du centre, serait plus petite que cet objet; que ce serait le contraire si l'objet était placé entre le foyer principal et le centre; enfin, qu'un objet placé entre le foyer et le miroir ne pro-

duirait pas d'image à [illegible] après la réflexion. Ces [illegible] par l'expérience. La circonstance [illegible] donner lieu à une expérience [illegible] un bouquet renversé qu'on a [illegible] agrandie et redressée par la réflexion [illegible] un spectateur convenablement [illegible] *ment placé*, car la *fig.* 277 [illegible] deux rayons partis du point P' de l'objet [illegible] doit se trouver dans la direction des rayons [illegible] la réunion se fait en PH, et, vu la grandeur [illegible] il peut embrasser l'ensemble des faisceaux [illegible] l'image totale.

Applications numériques. — *Miroir* [illegible]

439. Supposons que le rayon du miroir [illegible] de $0^m,75$, ; que la grandeur de la flèche PH [illegible] et que sa distance soit de 3 mètres [illegible] tion et la grandeur de l'image $P'H'$.

Cette image est évidemment [illegible] détermine par le n° 435 en [illegible]

$$\frac{2}{AC} = \frac{1}{AP} - \frac{1}{AP'}$$

Pour AC sa valeur $0^m,75$ et pour AP sa valeur $3^m,00$. On trouve $AP' = 0^m,428$. Voilà la position de l'image déterminée entre le centre et le foyer.

La grandeur sera fournie par la proportion du n° 438 qui est $P'H' : PH :: PC : PC$.

Dans cette proportion tout est connu, excepté PH' grandeur de l'image. $PH = 0^m,05$; $PC = AC - AP' = 0^m,75 - 0^m,428 = 0^m,322$; $CP = AP - AC =$

$3^m,00 - 0^m,75 = 2^m,25$. On a donc $P'H' : 0,05 :: 0,322 : 2,25$, d'où $P'H' = 0^m,007$.

Ainsi la grandeur de l'image est de 7 millimètres, tandis que celle de l'objet était de $0^m,05$ ou de 50 millimètres.

Par un calcul entièrement semblable on trouverait qu'un objet de 35 millimètres placé à $0^m,45$ de distance du même miroir donnerait une image de $0^m,175$ ou 175 millimètres placée à $2^m,25$.

Autre application. — Miroir convexe.

440. Un objet de $0^m,05$ est placé à 3 mètres de distance d'un miroir convexe dont le rayon est $0^m,75$. On demande la position et la grandeur de l'image (*fig.* 278).

On trouvera d'abord, par la formule du n° 436, que la distance AP' est de $0^m,33$. Ainsi l'image se trouve placée dans la concavité du miroir à $0^m,33$. De plus à cause de la similitude des triangles PHC et $P'H'C$, on a $PH : P'H' :: PC : P'C$, ce qui donne $0^m,0056$ pour $P'H$, ou la hauteur de l'image.

Déterminations des Foyers.

441. Avant d'employer des miroirs sphériques, dans des expériences, il est utile de pouvoir déterminer leurs foyers. Cette opération est fort simple. Si le miroir est concave, on le présente à un objet lumineux et éloigné, au soleil par exemple, on reçoit l'image sur un petit carton; le point F où l'image offre le plus de netteté, est le foyer principal; la distance AF est la distance focale principale; le double de AF est le rayon AC (*fig.* 279).

Si le miroir est convexe, il faut couvrir sa surface d'une

feuille de papier, et mettre à nu, sur un même diamètre, deux points à égale distance du centre de figure; présenter au soleil ce miroir ainsi disposé, recevoir sur un carton les rayons réfléchis jusqu'à ce que la distance *H K* soit double de *M N*. Il est visible qu'alors *D F* sera double de *A F* ou de *D A*. Cette dernière est donc égale à la distance focale principale (*fig.* 280).

Emploi des Miroirs pour exciter la combustion.

442. Quand on reçoit sur un miroir concave les rayons solaires, parallèlement à l'axe du miroir, il se concentre à son foyer une quantité de chaleur assez grande pour enflammer les corps combustibles, et même volatiliser les métaux.

Il est visible, d'après ce que nous avons dit sur les miroirs concaves, qu'en agrandissant les dimensions du miroir, on n'augmenterait pas l'effet proportionnellement.

Le Père Kirker a imaginé de substituer à un miroir courbe, un assemblage de miroirs plans, disposés de manière à déterminer la réunion des faisceaux lumineux en un même point.

Buffon fit construire un miroir polygonal composé de cent soixante-huit glaces étamées, susceptibles de se mouvoir en tout sens; de manière qu'étant le maître de varier l'inclinaison mutuelle des miroirs, on pouvait porter le foyer à différentes distances. Ce miroir brûlait le bois à 200 pieds, fondait les métaux (le plomb, le cuivre) à 45 pieds. (Buffon, *Hist. natur.*)

Ces expériences de Buffon rendent moins improbable tout ce que les histoires rapportent sur Archimède relativement au siége de Syracuse.

De la Réfraction.

443. La lumière éprouve à son entrée dans les milieux diaphanes, quand sa direction n'est pas normale à leur surface, une déviation à laquelle on a donné le nom de *réfraction*. Le point par lequel la lumière entre dans un milieu, s'appelle point d'*immersion*, celui par lequel elle en sort s'appelle point d'*émergence* (1).

L'angle d'incidence SIP (*fig.* 281), est formé par le rayon incident *S I* et la perpendiculaire *I P* menée par le point d'immersion à la surface *O B* du milieu; l'*angle de réfraction R I V* ou *R I U*, est celui que forme le rayon réfracté *I U* ou *I V* avec la même perpendiculaire prolongée en *I R* (2).

Dans l'hypothèse de l'émission, on conçoit que lorsqu'un rayon lumineux approche d'un milieu, l'attraction exercée par ce milieu sur les molécules dont le rayon se compose, change à la fois sa vitesse et sa direction, et que cette direction redevient de nouveau rectiligne lorsqu'il a pénétré dans le milieu jusqu'à une profondeur où l'attraction cesse d'être sensible. C'est en effet ce qui a lieu; et comme cette action ne s'exerce qu'à une distance très-petite, le rayon lumineux paraît brisé au point d'immersion (*fig.* 282). On prouve par le calcul que la vitesse

---

(1) Il existe des cristaux dans lesquels le faisceau incident se partage en deux faisceaux. Voyez *double réfraction*. Il ne s'agit ici que de la réfraction simple.

(2) *Voyez* à la fin de l'ouvrage, l'explication de la réfraction dans la théorie des ondes.

acquise par la lumière dans le second milieu est indépendante de la direction primitive du rayon, et que le rapport de cette vitesse à celle de la lumière incidente, est égal au rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction.

Loi de Réfraction.

444. En général, quand le second milieu est plus dense que le premier, l'angle de réfraction *R I V* (*fig.* 281) est plus petit que l'angle d'incidence *S I P*. Dans le cas contraire, l'angle *R I U* est plus grand que l'angle d'incidence *S I P*.

L'observation prouve, 1° que le rayon incident *S I*, la perpendiculaire *I R P* et le rayon réfracté *I V* ou *I U* sont dans un même plan ; 2° qu'il existe un rapport constant entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction. Par exemple, si le passage de la lumière se fait de l'air dans le verre, le sinus d'incidence est au sinus de réfraction, comme 3 est à 2; si le passage se fait de l'air dans l'eau, ce rapport est celui de 4 à 3. Cette loi est connue sous le nom de loi de Descartes, parce que c'est à ce philosophe que la découverte en est due.

445. Voici comment on démontre expérimentalement la loi de la réfraction.

Soit un prisme triangulaire *A B C* (*fig.* 283) d'une substance transparente; on le place de manière qu'une arête *A C* de sa base soit verticale, et son axe horizontal. On fait arriver un rayon *D F* perpendiculairement à la face d'incidence *A C*; pénétrant la substance sans éprouver de déviation, il rencontrera la face *A B* avec sa direction primitive; à sa sortie de la face *A B*, il éprouvera

une déviation telle, qu'il s'éloignera de la perpendiculaire et prendra la direction *E H*. On peut d'abord constater, à l'aide d'une règle verticale *l m*, que le rayon brisé *D E H* est dans un même plan, normal à la surface de séparation des deux milieux. On reconnaît de plus qu'il produit une image colorée et oblongue sur la règle *l m*. (Nous reviendrons sur cette dernière circonstance, à l'article *dispersion*.) Il s'agit maintenant de s'assurer de la constance du rapport des sinus d'incidence et de réfraction. Il suffit de connaître, dans la disposition que nous avons choisie pour le prisme, l'angle de réfraction; car l'angle d'incidence *D E N* est complément de *A E D*, et, l'angle réfringent *C A B* étant connu, on obtient *A E D*, son complément. Voyons comment on détermine l'angle de réfraction *I E H*. Cet angle se compose de *I E F* égal à l'angle d'incidence *D E N*, et de *H E F*. Pour avoir ce dernier, on mesurera *F H* et *E F*, ce qui est facile. D'une part *F H* est donné par les divisions de la règle *l m*, et *E F* par la distance de *l m* au prisme, ce qu'on peut déterminer rigoureusement. La connaissance des deux côtés *E F* et *F H* fournira le troisième *H E*; et le sinus de l'angle *F E H* est égal à *F H* divisé par *H E*. En répétant cette expérience avec des prismes de même matière, mais d'angles réfringens différens, l'on trouvera que la valeur du rapport $\frac{\sin i}{\sin r}$, est constante sous toutes les incidences. On donnera plus loin les procédés imaginés pour déterminer le même rapport $\frac{\sin i}{\sin r}$, dans les substances liquides ou aériformes.

446. La connaissance de la réfraction de la lumière

nous met à même de donner l'explication de plusieurs phénomènes. Ainsi, quand on se place à une certaine distance d'un vase vide, dans une position telle, que l'œil soit trop bas pour apercevoir le fond du vase, si l'on remplit le vase d'eau, le fond sera à l'instant aperçu, et cela parce que la lumière en sortant de l'eau dans l'air, éprouve une réfraction qui l'éloigne de la perpendiculaire, et peut parvenir à l'œil, quoique le point aperçu en soit séparé par la paroi opaque du vase. L'apparence que présente un bâton plongé en partie dans l'eau, s'explique de la même manière; la possibilité de voir le soleil ou tout autre astre placé au-dessous de l'horizon, est encore due en grande partie à la réfraction qu'éprouve la lumière à son entrée du vide dans notre atmosphère.

Réfraction dans les milieux terminés par des surfaces courbes.

447. L'indication des principaux résultats présentés par la lumière, à son entrée dans les milieux terminés par des surfaces courbes, est indispensable pour rendre facile la conception des instrumens d'optique, du mécanisme de la vision, etc.

Considérons d'abord un milieu en verre, indéfini d'un côté, et terminé de l'autre côté par une portion *m A n* de surface sphérique (*fig.* 284); supposons un rayon *S I* parallèle à l'axe *A C* du milieu *m A n C*. Pour bien apprécier le genre de déviation qu'éprouve ce rayon au point d'incidence *I*, il faut du centre *C* de la sphère, mener le rayon *C I*, qui est perpendiculaire au plan tangent *K L*; ce dernier, puisqu'une surface courbe n'est que la réunion

d'un nombre infini de surfaces planes, se confond avec la sphère au point I. La lumière passant d'un milieu plus rare dans un milieu plus dense, se rapproche de la perpendiculaire, et va rencontrer l'axe $A\,C$ en P. C'est en ce point P, qu'on nomme *foyer*, que se fait la concentration de tous les rayons parallèles à $S\,I$ et également éloignés de l'axe.

Les rayons plus éloignés de l'axe se réuniront en P'', et les rayons moins éloignés en P'. En sorte que le foyer n'est pas un point unique, mais il en approche d'autant plus, que la surface $m\,A\,n$ est moins étendue.

Si le point lumineux est placé sur l'axe en P (*fig.* 285), le rayon incident $P\,I$, faisant un angle d'incidence $P\,I\,C'$ plus grand que dans le cas du parallélisme (*fig.* 284), donnera un angle de réfraction $C\,I\,P'$ aussi plus grand, et le foyer P' devra être plus éloigné. L'inspection de la figure 285 fait voir que, si le point lumineux était trop rapproché du milieu $m\,A\,n$, les rayons réfractés ne couperaient point l'axe; il résulte de cette remarque, que la marche du foyer P' est en sens inverse de celle du point lumineux (1).

---

(1) Appelons ι le rapport $\frac{\sin P\,I\,C'}{\sin C\,I\,P'}$, ce rapport est sensiblement égal à $\frac{P\,I\,C'}{C\,I\,P'}$ vu la petitesse des angles $P\,I\,C'$ et $C\,I\,P'$; la comparaison des triangles PIC et CIP' donne $CIS' = ACI + CPI$; $CIP' = ACI - CP'I$, en multipliant cette dernière équation par le rapport de réfraction ι, et en retranchant la première, et effaçant CIS' et son égal $CIP'\,\iota$, il vient en $(\iota - 1)\,ACI = CPI + \iota\,CP'I = API + \iota\,AP'I$; en substituant les tangentes aux angles, on a $(\iota - 1)\,\frac{A'I}{A'C} = \frac{A'I}{A'P} + \frac{\iota\,A'I}{A'P'}$; en divisant tout

Application.

448. Un objet de la longueur de 0^m07 est placé d'abord à $0^m,259$; ensuite à $3^m,35$, d'un milieu terminé par une sphère dont le rayon est égal à $0^m,75$: on demande la grandeur et la position de l'image. Le rapport de réfraction $l = \frac{3}{2}$. Pour la première distance $0^m,259$, on trouve $AP' = -0,469$. Ce signe négatif indique que l'image se trouve hors du milieu du côté même de l'objet. La grandeur de l'image $P'H'$ est $0^m,085$ (*fig.* 286). Pour la seconde distance $3^m,55$; on trouve $AP' = 4^m,074$, l'image se trouve dans le milieu (*fig.* 287). Sa grandeur est déterminée par la comparaison des deux triangles semblables PHO et $OP'H'$.

Ces deux triangles donnent $PH : P'H' :: OP : OP'$ ou $0,07 : P'H' :: 4,10 : 3,324$, d'où $P'H' = 0^m,057$.

---

par $A'I$ et remarquant que AA' est sensiblement nul, puisque l'arc AI est une très-petite partie de la sphère, on a, pour la relation cherchée :

$$\frac{(l-1)}{AC} = \frac{1}{AP} + \frac{l}{AP'} \quad (a).$$

Si l'on suppose $AP = \infty$ on a $AP' = \frac{AC \times l}{l-1}$; c'est là l'expression de la distance focale principale. On peut d'ailleurs la déterminer directement (*fig.* 284). Si le point lumineux était trop près du milieu pour que la réfraction pût faire converger le rayon vers l'axe AC, on aurait (*fig.* 285 *bis*), par un calcul tout-à-fait semblable, $\frac{l-1}{AC} = \frac{1}{AP} - \frac{l}{AP'}$. De sorte qu'en remplaçant AC, AP, AP' par r, p et p', la formule générale est $\frac{l-1}{r} = \frac{1}{p} \pm \frac{l}{p'}$; le signe $+$ étant pris pour le rayon réfracté dans le milieu (*fig.* 285).

Ces deux exemples sont bien propres à montrer l'influence de la distance sur la position de l'image.

Lentilles.

449. Maintenant que nous connaissons la déviation qu'éprouve la lumière à son entrée dans un milieu en verre, terminé par une portion de surface sphérique, nous nous proposerons de connaître la marche qu'elle suit dans son passage à travers une lentille. Nous supposerons que cette lentille soit biconvexe (*fig.* 288).

Pour trouver la déviation d'un rayon de lumière $S\,I$, parallèle à l'axe $C\,A\,C'$, menez au point I d'incidence, le rayon de la sphère; il sera perpendiculaire au plan tangent au point I. Le rayon lumineux se rapprochera de cette perpendiculaire, et suivra la direction $I\,m$; à la rencontre de la surface $A\,m$, il éprouvera une seconde déviation, et au lieu de continuer sa route en ligne droite $I\,m\,P'$, il s'écartera de la perpendiculaire $C'\,m$, et ira couper l'axe en P; ainsi il est visible que, si l'on suppose autour de l'axe $C\,A\,C'$ une infinité de rayons parallèles à $S\,I$, et également éloignés de l'axe, ils iront couper ce dernier au même point P; pour les rayons plus ou moins éloignés de l'axe que le rayon $S\,I$, le foyer sera plus ou moins rapproché de la lentille (n° 447). Le point P s'appelle le *foyer principal* de la lentille.

Les lentilles biconvexes concentrent la lumière à leur foyer et sont appelées, pour cette raison, lentilles convergentes. Les lentilles biconcaves dispersent au contraire la lumière, et ont reçu le nom de lentilles divergentes.

Soit le rayon $S\,I$ faisant partie d'un faisceau cylindri-

que, parallèle à l'axe *C A C'* de la lentille biconcave et tombant en *I*, sur la face antérieure de cette lentille; arrivé au point *I*, il sera réfracté, et, comme il passe de l'air dans le verre, il se rapprochera de la perpendiculaire *C I* et suivra la direction *I n;* à la seconde surface, il subira une nouvelle réfraction, et au lieu de continuer de suivre la route rectiligne *I n D*, il s'écartera de la perpendiculaire *C' m*, et prendra la direction *n F'* (*fig.* 289).

Tout autre rayon de lumière tombant parallèlement à l'axe sur la lentille, s'éloigne de l'axe après son émergence, de sorte que la lumière réfractée ne va pas rencontrer l'axe. Il n'y a donc ici aucun foyer réel; si l'on prolonge le rayon *n F* dans le sens *F n*, il ira couper l'axe en *P*. On donne à ce point le nom de *foyer imaginaire* ou de *foyer virtuel*, pour le distinguer du foyer réel des lentilles convergentes qui a une existence physique, déterminée par la réunion effective des rayons.

450. Il y a encore des lentilles planes-convexes, planes-concaves et convexes-concaves, le rayon extérieur de ces dernières étant plus grand ou plus petit que le rayon intérieur (*fig.* 290). La différence de densité du verre et de l'air, combinée avec les diverses configurations, nous mènerait à des résultats qu'il est facile de prévoir; en général, pour tracer la marche de la lumière dans une lentille, il faut mener à chaque point d'incidence une perpendiculaire; si le passage se fait d'un milieu plus rare dans un milieu plus dense, elle se rapproche de la perpendiculaire; elle s'en éloigne dans le cas contraire.

Détermination des foyers.

451. Pour connaître le foyer d'une lentille convergente

on expose cette lentille à une lumière très éloignée, à la lumière solaire, par exemple, et l'on reçoit l'image sur un carton; le point de la plus grande netteté, est le foyer; la distance entre la lentille et le foyer, est la distance focale principale.

L'opération de la détermination du *foyer virtuel* d'une lentille divergente (*fig.* 291), est un peu plus compliquée. On applique une feuille de plomb sur la face opposée à celle qui reçoit la lumière du soleil; on laisse seulement deux petites ouvertures a et b. On reçoit la lumière réfractée en H et en K sur un carton, qu'on fait mouvoir jusqu'à ce que la distance HK soit double de ab; et dans ce cas, vu la similitude des triangles HKP et aPb, Pr est double de Po, et conséquemment de ro. Ainsi, quand le carton sera dans une position telle que HK sera double de ab, on mesurera la distance or, on aura la distance focale principale, puisque $or = oP$ ou $o'P$; car l'épaisseur de la lentille est en général tellement petite, qu'on peut la négliger (1).

---

(1) *Calcul de la relation qui existe entre les deux foyers d'une lentille.*

Soit P un point lumineux sur l'axe CAC' de la lentille (*fig.* 292), un rayon PI de lumière parti de ce point, et rencontrant la lentille en I est refracté suivant I'; si le milieu était indéfini, le rayon réfracté irait couper l'axe en P': mais il n'en est pas ainsi; au point I' le rayon II' passe du verre dans l'air, s'écarte de la perpendiculaire CI' et va couper l'axe en P'' plus près de la lentille. Il s'agit d'avoir la relation qui lie la distance donnée $A'P$ à la distance cherchée $A'P''$.

La note précédente donne pour $A'P'$ la relation :

$$\frac{l-1}{A'C'} = \frac{1}{A'P} + \frac{l}{A'P'}.$$

452. Le point P' obtenu par l'équation c est le foyer des rayons parallèles, AP'' est la distance focale principale.

La relation (b) est applicable à toutes les lentilles; il suffira de prendre AC et $A'C'$ positivement dans le cas où la convexité est tournée en dehors; et négativement dans le cas contraire. Par exemple, veut-on la distance focale principale d'une lentille biconcave; il faudra faire dans l'équation (c) AC et $A'C'$ négatifs, on aura $\frac{1}{AP''} = -\frac{l-1}{CA} - \frac{l-1}{A'C'}$ (d) valeur qu'on trouverait directement pour AP de la figure 289, si l'on faisait sur cette figure les calculs de la note précédente.

On voit aussi d'après l'équation (b) que $A'P$ et AP'' doivent inversement varier; ainsi, si $A'P$ augmente, c'est-

---

De plus, si un rayon de lumière parti de P'', tombait sur la face nAm, il reprendrait la direction $I'I$, de sorte que si le milieu était indéfini, il faudrait prolonger le rayon dans le sens II' pour qu'il rencontrât l'axe en P'; la comparaison des triangles $P''IC$, $P'IC$ donnerait

$$\frac{l-1}{AC} = \frac{1}{AP''} - \frac{l}{AP'}.$$

Ajoutant ces deux équations et observant que $A'P'$, est sensiblement égal à AP', on aura $\frac{l-1}{AC'} + \frac{l-1}{AC} = \frac{1}{AP} + \frac{1}{AP''}$, ou, en faisant $AC = r$, $AC' = r'$, $AP' = p$ et $AP'' = p'$:

$$\frac{l-1}{r'} + \frac{l-1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (b).$$

C'est là la relation cherchée. Si le point P est placé à l'infini $A'P$ ou $p = \infty$ et la relation devient $\frac{l-1}{r'} + \frac{l-1}{r} = \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$ (o).

a est la distance focale principale de la lentille. On la représente par une lettre particulière.

à-dire si l'objet est placé à une plus grande distance de la lentille, l'image s'en approchera; l'image au contraire s'éloignerait, si l'objet s'approchait.

Images produites par la réfraction à travers les lentilles.

453. Un objet lumineux $P\,H$, est placé devant une lentille convexe $A\,A'$, (*fig.* 293), à une distance finie et déterminée; on demande la position et la grandeur de l'image $P'\,H'$.

Pour résoudre cette question, il faut d'abord définir *le centre optique*, ensuite indiquer la construction du foyer pour un point lumineux situé hors de l'axe.

1° Le centre optique est ce point particulier, qui existe dans chaque lentille, et qui est tel, que tout rayon qui y passe, sort dans une direction parallèle à la direction qu'il avait avant son entrée dans la lentille; de sorte qu'à cause de la petitesse de la lentille, le rayon n'éprouve pas sensiblement de déviation.

Pour déterminer ce point, qu'on mène (*fig.* 294), les deux rayons de sphère $c\,m$ et $c'\,n$, parallèles entre eux. Soit de plus un rayon lumineux tombant en n, dans une inclinaison telle, qu'après sa réfraction, il aille rencontrer l'autre face en m, il est clair, puisque les élémens m et n sont parallèles, que le rayon émergent $s'\,m$ sortira parallèle au rayon incident $s\,n$. Les deux triangles semblables $c\,m\,o$ et $c'\,n\,o$ donneront la proportion $c\,m : c'\,n :: c\,o : c'o$ ou $c\,a : c'a' :: c\,o : c'o$, d'où $c\,a - c\,o = a\,o : c'a' - c'o = a'\,o :: c\,a : c'\,a'$, c'est-à-dire que le centre optique divise l'axe de la lentille en deux parties pro-

portionnelles aux rayons des faces auxquelles elles aboutissent.

Le centre optique d'une lentille biconvexe ou biconcave formée de deux courbures égales, se trouve au milieu o de la lentille (*fig.* 294 et 294 *bis*); dans une lentille plane-convexe ou plane-concave, au sommet de la partie courbe. Le centre optique d'une lentille concave-convexe (*fig.* 295), se trouverait par un calcul semblable au précédent.

2°. Soit un point lumineux s, situé hors de l'axe (*fig.* 295 *bis*); il s'agit d'avoir la relation propre à faire connaître la distance op : pour cela on mène la ligne so par le centre optique; le foyer conjugué p se trouvera nécessairement sur le prolongement de cette ligne. On le déterminera, en menant la ligne si parallèle à l'axe coc'; cette ligne, après sa réfraction, va couper l'axe au foyer des rayons parallèles en f, et rencontre enfin en p la ligne so prolongée. A cause de la petite épaisseur de la lentille, on peut supposer la ligne sid complètement parallèle à l'axe cc'. On aura donc, en comparant les triangles semblables sdp et ofp :

$$sp : op :: sd : of.$$

En substituant aux distances conjuguées (n° 451), so, op, et à la distance focale principale of les lettres p, p' et a qui les représentent, et faisant attention que sd égale sensiblement so, on a

$$p + p' : p' :: p : a, \text{ d'où l'on tire :}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a} \text{ ou bien } = \frac{l-1}{r} + \frac{l-1}{r'} \quad (c).$$

Cette relation est absolument la même que celle que nous avons trouvée (note précédente) pour un point placé sur l'axe.

454. Rien n'est plus facile actuellement que de trouver la position et la grandeur de l'image PH (*fig.* 293). Pour cela, il suffit de mener, de l'extrémité P de l'objet, la ligne POP' par le centre optique de la lentille : cette ligne sera l'axe du faisceau de tous les rayons émanés du point P, et le foyer déterminé par la relation (c) sera en P'. De la même manière on détermine la position de tous les autres foyers, et conséquemment celui de l'image $P'H'$. On voit que l'image est renversée et placée au-delà de la lentille, que le renversement tient à ce que les foyers se forment au-delà du point de croisement des axes des faisceaux. On peut recevoir cette image sur un carton blanc, l'expérience réussit bien avec une bougie. On aura l'occasion de vérifier toutes les autres particularités du phénomène. Ainsi l'on verra que l'image s'éloigne lorsque l'objet s'approche, et réciproquement.

Application aux lentilles.

455. 1re Question. Un objet PH de $0^m,075$ (*fig.* 293) est placé à $1^m,25$ de distance d'une lentille, dont les courbures sont égales; le rayon de chacune de ces courbures est $0^m,65$: on demande la grandeur et la position de l'image. La lentille est un verre placé dans l'air. Le rapport l entre le sinus d'incidence et de réfraction, est égal à $\frac{3}{2}$. En faisant $l = \frac{3}{2}$, $r = r' = 0^m,65$ et $p = 1^m,25$, dans la formule (b) de la note du n° 451, on trouve $OD' = 1^m,354$. L'image est donc placée à $1^m,354$ de la lentille, en $H'P'$; mais, par la similitude des triangles POD et $P'D'O$, et des triangles HOD et $H'OD'$, on a $PH : P'H' :: OD : OD'$, d'où $P'H' = \frac{PH \times OD'}{OD} = \frac{0,075 \times 1,354}{1,25}$ $= 0^m,081$. Telle est la grandeur de l'image.

2° Question. Le même objet PH, de $0^m,075$ est placé à $0^m,25$ de la même lentille; on demande la grandeur et la position de l'image.

L'image est placée à $0^m,406$ en deçà de la lentille; sa grandeur est de $0^m,122$.

Lentille biconcave.

456. 3° Question. Un objet PH, de $0^m,075$ est placé à une distance de $1^m,25$, devant une lentille biconcave, dont les deux faces sont également courbes; le rayon de chacune des courbures $= 0^m,65$; trouver la position et la grandeur de l'image (*fig.* 296).

Nous avons dit que la formule des lentilles biconvexes était applicable aux lentilles biconcaves en changeant le signe des rayons. La formule des lentilles biconcaves est donc, $-\frac{l-1}{r} - \frac{l-1}{r'} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$, ou, les rayons r et r' étant égaux, $-\frac{2(l-1)}{r} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$; faisant $r = 0^m,65$; $p = 1^m,25$, on trouve $p' = -0^m,427$. Le signe négatif indique qu'il n'y a pas d'image au-delà de la lentille, mais en deçà, en $P'H'$; et l'on a, puisque les points A et O sont très-rapprochés l'un de l'autre, $PH : P'H' :: AP : AP' :: p . p'$, d'où $P'H' = \frac{0^m,075 \times 0^m,427}{1^m,25} = 0^m,025$.

La marche du rayon lumineux $P\,m\,n$, montre assez l'impossibilité de la formation d'une image au-delà de la lentille, et que ce n'est que sur le prolongement du rayon $D\,n$ qu'on peut trouver le foyer P'. C'est là le foyer vir-

tuel ou imaginaire des lentilles biconcaves. On n'a pas tracé la marche des autres rayons, afin de ne pas trop compliquer la figure; la détermination des autres foyers n'offrirait aucune difficulté.

On trouverait de la même manière l'image produite à travers une lentille convexe-concave; alors les signes des deux rayons seraient l'un positif, l'autre négatif.

457. Dans tout ce qui précède nous avons supposé que le passage de la lumière se faisait toujours de l'air dans le verre, ou dans toute autre substance plus dense que l'air: c'est en effet là le cas le plus communément présenté par les observations et par les instrumens. Au reste, rien ne serait plus facile que de trouver la marche de la lumière dans le passage d'un corps plus dense dans un corps plus léger. Dans ce dernier cas la lumière s'écarte de la perpendiculaire, de sorte que les lentilles biconvexes deviennent divergentes, et les lentilles biconcaves convergentes, etc.

458. Les lentilles convergentes sont employées pour corriger le défaut de la vue appelé presbytisme; on sait que ce défaut consiste dans l'aplatissement de la partie antérieure de l'œil : ce défaut existe chez presque tous les vieillards. La réunion des rayons lumineux envoyés par les objets, s'opère au-delà de la rétine, et la vision est confuse. Une lentille convergente placée au-devant de l'œil, diminue la divergence des rayons et rend possible leur réunion sur la rétine même, et la vision devient nette et distincte.

Le miopisme est le défaut opposé au presbytisme; il se rencontre chez beaucoup de jeunes gens. La trop grande convexité de l'œil réunit trop tôt les rayons lumineux, et la

vision est confuse. Une lentille divergente placée au-devant de l'œil, augmente la divergence des rayons, les fait concourir sur la rétine, et la vision est rendue distincte.

Comme la courbure de l'œil varie avec l'âge, le changement de verres devient nécessaire.

Nous verrons plus tard beaucoup d'autres usages des lentilles.

Lentilles en échelons.

459. Buffon et différens physiciens avaient conçu la possibilité de former des lentilles composées. M. Fresnel, dans ses recherches sur les phares, ayant songé à substituer des verres ardens aux miroirs paraboliques employés jusqu'à ce jour, a dû naturellement chercher à perfectionner les grands verres lenticulaires, et a été conduit à former des lentilles en échelons.

Voici la manière de les construire. Du point P (*fig.* 297) on décrit une portion de sphère $A\,B$, ensuite d'un point P', pris hors de l'axe, on décrit une autre surface sphérique. Continuant de la même manière, on obtient une lentille composée de diverses parties, dont la section par un plan passant par l'axe, est représentée par la figure 297. Le calcul donne la position de chaque centre et la valeur du rayon correspondant.

Ces lentilles exposées au soleil produisent à leur foyer une chaleur énorme; de minces feuilles de tôle qu'on y place sont percées à l'instant.

Puisque ces lentilles réunissent en un point unique, des rayons parallèles qui tombent sur leur surface, elles doivent rendre parallèles des rayons émis par un point lumineux placé à leur foyer. Mais une lumière ayant toujours

des dimensions plus ou moins grandes, une portion du faisceau a une forme conique.

Indices de réfraction; puissances réfractives; pouvoirs réfringens.

460. Dans l'hypothèse de l'émission, on a appelé *puissance réfractive* une fonction $u^2(l^2-1)$ de la vitesse de la lumière dans le vide, et du rapport de réfraction. Cette puissance est proportionnelle à la densité du milieu, dans lequel la lumière a pénétré, de sorte que si l'on divise l'expression précédente par cette densité que nous représenterons par d, le quotient $\frac{u^2(l^2-1)}{d}$ pourra être considéré comme la puissance réfractive de chaque molécule. C'est ce qu'on a appelé *pouvoir réfringent.*

l étant égal à $\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{v}{u}$, $u^2(l^2-1)$ est égal à v^2-u^2, ou à l'accroissement de la vitesse de la lumière.

u^2 est le carré de la vitesse de la lumière dans le vide. Cette quantité, étant facteur commun, peut être supprimée dans la comparaison des pouvoirs réfringens. Il ne reste donc qu'à déterminer la quantité l que nous savons être égale au rapport $\frac{sin.\ i}{sin.\ r}$. C'est ce dernier rapport qui est connu aujourd'hui sous le nom d'*indice de réfraction.*

Ce rapport, pour les corps solides, peut être déterminé par le procédé rapporté n° 444, ou par d'autres procédés analogues.

S'il s'agit des liquides, on les renferme dans des vases prismatiques formés par des glaces à faces planes et parallèles; car des lames parallèles ne changeant pas la direc-

tion de la lumière, la réfraction observée est due entièrement à la substance liquide. Voici la disposition qui paraît la plus avantageuse : on pratique une cavité cylindrique dans une plaque de verre épaisse, qu'on taille ensuite en prisme. On a soin que les deux faces soient bien planes et bien polies. On ferme cette cavité avec des lames de verre, également planes et polies; on les fixe avec des règles en cuivre. Pour introduire le liquide commodément, on creuse dans la plaque de verre un canal vertical *c d*, qu'on ferme avec un bouchon de verre (*fig.* 298). On s'assure, avant l'introduction du liquide, du parallélisme des faces de chaque lame.

On modifie encore ce procédé pour les substances aériformes. A cause de la faiblesse de leur puissance réfractive, on donne au prisme un angle très-grand; on emploie à cet effet un gros tube de verre cylindrique et taillé en biseau à ses deux extrémités, auxquelles on fixe deux glaces planes et polies. Au tube est adapté un robinet, de manière qu'on peut y faire le vide à l'aide de la machine pneumatique. On y introduit ensuite le gaz qu'on veut soumettre à l'expérience. On connaît son élasticité et sa température par un baromètre et un thermomètre : le baromètre est représenté par *A B* dans un grand tube qui communique avec le prisme. L'expérience sur les gaz demande beaucoup de précautions; ils doivent avant leur introduction dans le prisme, être parfaitement desséchés; il faut de plus, dans les calculs, tenir compte de la température et de la pression de chaque gaz; enfin il est encore indispensable d'apprécier avec exactitude la quantité dont le prisme vide réfracte la lumière (*fig.* 299).

MM. Biot et Arago ont déterminé avec cet appareil les

puissances réfractives de plusieurs gaz. Ces physiciens mesurent à l'aide d'un cercle répétiteur, la déviation qu'éprouve la lumière par son passage à travers le prisme et rempli successivement de chacun des fluides élastiques. Ce procédé exige une grande habileté dans l'art des expériences, puisque le prisme d'un angle de 145°, et rempli d'air à $0^m,76$ ne produit qu'une déviation de 5′ environ. L'angle du prisme étant connu, comment déduire de la déviation fournie par le prisme plein d'un gaz, l'indice de réfraction correspondant à ce gaz? C'est ce qui exige des calculs trop longs pour que nous les rapportions ici. (*Voyez* le t. 7 des *Mém. de l'Inst.*, 1806.)

En ajoutant à cet appareil (*fig.* 300) un large tube rempli de mercure, on peut avoir le gaz à différens degrés d'élasticité. Si on laisse tomber le mercure par le robinet inférieur, le gaz se dilate et diminue de densité; l'élasticité est mesurée par un baromètre communiquant avec le prisme. On enlève chaque gaz après l'expérience, à l'aide d'une machine pneumatique. S'il est de nature à corroder la pompe et le baromètre, son élasticité se mesure par la différence de niveau du mercure dans les tubes *i* et *z*. Il n'est plus retiré par la pompe, mais il en est chassé, après l'opération, par un courant d'hydrogène ou d'acide carbonique. (M. Dulong.) (*Ann. ch. et phy.*, t. 31.)

A l'aide de cet appareil, M. Dulong a mesuré les indices de réfraction d'un nombre considérable de fluides élastiques. Le procédé de ce savant académicien diffère de celui de MM. Biot et Arago. Il consiste à faire varier la densité du gaz intérieur jusqu'à ce que la déviation produite par ce gaz soit égale à celle que produit l'air atmo-

phérique sous une pression connue. Alors, à l'aide de la relation entre les accroissemens de vitesse de la lumière et les élasticités d'un même gaz (n° 462—2°), on trouve quels seraient les accroissemens, si les deux fluides avaient la même élasticité.

Pour des gaz ayant une puissance réfractive moindre que l'air, comme l'oxigène et l'hydrogène, il faudrait les comprimer pour leur donner la même puissance réfractive qu'à l'air. M. Dulong dilate au contraire ce dernier gaz, ce qui revient au même et ce qui est beaucoup plus facile. M. Dulong a aussi formé un tableau des puissances réfractives des principaux gaz et des principales vapeurs, la puissance réfractive de l'air étant prise pour l'unité.

Pour constater l'égalité de vitesse de la lumière dans deux gaz, M. Dulong emploie une lunette astronomique munie de fils croisés à son foyer, qu'il dirige sur une mire et à travers le prisme ouvert. Si les faces sont parallèles, il n'y a aucune déviation. Cette condition n'est pas au reste nécessaire dans le procédé dont il est question.

Puissances réfractives des gaz à la même température et sous la même pression, celle de l'air étant prise pour unité.

Noms des gaz.	Puiss. réfract.	Densité.
Air atmosphérique.	1	
Oxygène.	0,924	1,1026
Hydrogène.	0,470	0,0685
Azote.	1,000	0,976
Chlore.	2,625	2,47
Oxide d'azote.	1,710	1,527
Gaz nitreux.	1,053	1,039
Acide hydrochlorique.	1,527	1,254
Oxide de carbone.	1,157	0,972

Noms des Gaz.	Puiss. réfract.	Densité.
Acide carbonique.	1,526	1,526
Cyanogène.	2,852	1,818
Gaz oléfiant.	2,502	0,980
Gaz des marais.	1,504	0,559
Ether muriatique.	3,72	2,234
Acide hydrocyanique.	1,531	0,944
Ammoniaque.	2,309	0,591
Oxi-chloro-carbonique.	3,936	3,442
Hydrogène sulfuré.	2,187	1,178
Acide sulfureux.	2,260	2,247
Ether sulfurique.	3,197	2,580
Soufre carburé.	3,110	2,644
Hyd. phosphoré au *min*.	2,682	1,256

Ce tableau donne le rapport des puissances réfractives, ou les rapports des accroissemens de vitesse de la lumière lorsqu'elle traverse chacun des fluides élastiques inscrits dans le tableau. L'unité commune étant l'accroissement de la vitesse dans l'air à force élastique égale, si l'on veut déduire de là les indices de réfraction, il faudra multiplier tous les nombres du tableau par 0,000294. Puisque d'après les observations astronomiques de Delambre et les mesures directes de MM. Biot et Arago, l'augmentation de vitesse de la lumière dans l'air à $0^m,76$ et à zéro, est de 0,000294 de la vitesse dans le vide. Les produits ainsi obtenus seront les accroissemens absolus de la vitesse de la lumière dans chacun des fluides élastiques. Ces accroissemens augmentés de l'unité, vitesse de la lumière dans le vide, deviendront les indices de réfraction. Ces indices sont inscrits dans le tableau ci-joint, avec les puissances réfractives correspondantes.

Noms des gaz.	Indices de réfract. $i = \frac{\sin i}{\sin r}$.	Puissances réfract. ou $i^2 - 1$.
Air atmosphérique	1,000294	0,000589
Oxygène	1,000272	0,000544
Hydrogène	1,000138	0,000277
Azote	1,000300	0,000601
Ammoniaque	1,000385	0,000771
Acide carbonique	1,000449	0,000899
Chlore	1,000772	0,001545
Acide hydrochlorique	1,000449	0,000899
Oxide d'azote	1,000503	0,001087
Gaz nitreux	1,000303	0,000606
Oxide de carbone	1,000340	0,000681
Cyanogène	1,000834	0,001668
Gaz oléfiant	1,000678	0,001356
Gaz des marais	1,000443	0,000886
Ether muriatique	1,001095	0,002191
Acide hydrocyanique	1,000451	0,000903
Oxi-chloro-carbonique	1,001159	0,002318
Acide sulfureux	1,000665	0,081331
Hydrogène sulfuré	1,000644	0,001288
Ether sulfurique	1,001153	0,003061
Soufre carburé	1,001150	0,00301
Hydrogène proto-phosphorique	1,000789	0,001579

Tableau des indices de réfraction et des puissances réfractives de plusieurs corps liquides et solides.

NATURE DES SUBSTANCES RÉFRINGENTES.	INDICES DE RÉFRACTION $\ell = \frac{\sin i}{\sin r}$.	PUISSANCES RÉFRACTIVES $\ell^2 - 1$.
Baryte sulfatée	1,645	1,699
Verre d'antimoine	1,888	2,568
Chaux sulfatée	1,488	1,212
Verre commun	1,550	1,402
Cristal de roche	1,562	1,444
Spath d'Islande	1,666	1,777
Sel gemme	1,545	1,388
Alun	1,458	1,126
Borax	1,466	1,151
Nitre	1,524	1,345
Chromate de plomb. } (1)	2,970	7,811
	2,926	7,561
Réalgar	2,549	5,497
Fer sulfaté	1,515	1,294
Acide sulfurique	1,428	1,041
Acide phosphorique solid.	1,544	1,384
Eau de pluie	1,336	0,784
Gomme arabique	1,476	1,178
Esprit-de-vin bien rectifié	1,370	0,876
Camphre	1,500	1,250
Huile d'olive	1,466	1,151
Huile de lin	1,481	1,194
Essence de térébenthine	1,471	1,155
Ambre	1,555	1,420
Diamant	2,439	4,949
Phosphore	2,224	3,946
Soufre fondu	2,148	3,614
Soufre natif	2,115	3,473

461. Voici les principales conséquences tirées des re cherches sur les puissances réfractives.

1°. En général, toutes choses égales d'ailleurs, les sul stances inflammables ont une puissance réfractive consi dérable. (Newton.) Nous voyons cependant que le chro

(1) Le chromate de plomb jouissant de la double réfraction a deux v leurs de ℓ. (*Voyez* double réfraction.)

mate de plomb a une puissance réfractive plus considérable qu'aucune autre substance.

2°. MM. Arago et Biot ont constaté que pour un même gaz, l'augmentation (1) de vitesse de la lumière, en passant du vide dans un gaz, reste exactement proportionnelle à sa densité. M. Dulong a vérifié cette loi sur plusieurs gaz que MM. Arago et Biot n'avaient pas soumis à leurs expériences.

3°. MM. Arago et Petit ont reconnu que les vapeurs ont un pouvoir réfringent moindre que les liquides d'où elles émanent, du moins c'est le résultat fourni par le sulfure de carbone, l'éther sulfurique, et l'éther hydrochlorique. (*Ann. ch. et ph.*, t. 1.)

4°. Un résultat encore très-remarquable, c'est que l'eau, d'après M. Arago, réfracte de plus en plus, même en acquerrant moins de densité par son refroidissement au-dessous de la température de 4°. D'après Euler, le verre chaud réfracte plus que le verre froid.

5°. Il paraît bien démontré, par les expériences, qu'il n'existe aucun rapport simple entre les puissances réfractives des substances élémentaires ou composées. Ainsi la puissance réfractive de l'hydrogène est presque la moitié de celle du gaz oxygène, et sa densité est 13 ou 14 fois moindre.

La puissance réfractive de la vapeur d'éther hydrochlorique est supérieure de $\frac{3}{5}$ à celle de l'acide sulfureux; la densité de la première est plus faible que celle du second.

La vapeur d'éther sulfurique a une puissance réfractive

(1) Ou la diminution de la vitesse, si l'on admet l'hypothèse des ondes.

double de celle du chlore; sa densité est très-peu supérieure.

Le gaz oléfiant a sensiblement la même densité que le gaz oxide de carbone, et la puissance réfractive du premier est presque double de celle du second.

6°. L'air est le seul gaz composé dont le pouvoir de réfraction soit égal à celui qu'on déduit de ses élémens.

La puissance réfractive déduite des élémens de l'ammoniaque est d'un douzième plus grande que celle qui appartient réellement à ce gaz; les autres gaz et les vapeurs donnent des différences encore plus grandes.

Les résultats 5° et 4° ne sont pas favorables à la théorie de l'émission; dans cette théorie le pouvoir réfringent d'un corps devrait être indépendant de l'état de ce corps.

Voyez le *Mém.* de M. Dulong, *An. ch. et phy.*, t. 31, p. 154.

462. M. Wollaston a proposé un procédé ingénieux pour mesurer le pouvoir réfringent des corps opaques; nous ne donnerons qu'une idée succincte de ce procédé fondé sur la réflexion totale de la lumière.

Pour constater le phénomène de la réflexion totale au contact de deux milieux, déposez une goutte d'un liquide d'eau, par exemple, sous un prisme (*fig.* 301), et tournez le prisme sur son axe. Vous remarquerez que la réflexion totale aura lieu plus tard au point de la goutte d'eau, que sur les autres points de la face *A B*. Peu à peu les rayons devenant plus obliques, la réflexion totale commence au point *m*, et la goutte d'eau disparaît. Supposons qu'on remplace la goutte d'eau par une substance opaque, et qu'au lieu de faire tourner le prisme, on abaisse l'œil le long d'une règle (*fig* jusqu'à ce que la réflexion totale ait [illegible] point [illegible] du corps opaque placé

en *m*. Les lignes *C H* et *C K* étant divisées, on connaîtra l'angle d'incidence correspondant à la réflexion totale, et par le calcul on trouvera le pouvoir réfringent du corps. Wollaston, Malus, M. Brewster, ont appliqué ce procédé.

Voyez, à l'article du microscope, un procédé de M. Brewster pour mesurer l'indice de réfraction des liquides.

Voyez aussi la diffraction, pour un nouveau moyen de mesurer la force réfringente des gaz proposé par M. Arago.

Mirage.

463. Dans ce qui précède, nous avons considéré des milieux d'une densité uniforme; le mouvement de la lumière s'y est fait en ligne droite. Il n'en serait plus de même si la densité était variable. Un milieu d'une densité variable peut être considéré comme formé par la superposition d'une infinité de couches de densités différentes et d'une hauteur très-petite, de sorte que la direction du rayon se trouve à chaque instant modifiée. Si la densité des couches va en décroissant de haut en bas, le rayon de lumière parcourra ce milieu suivant une courbe dont les deux branches seront symétriques (*fig.* 303). Si un observateur se trouve placé en *D*, et qu'il regarde un objet *B*, il pourra voir deux images; l'une directement en *B*, et l'autre dans la direction de la tangente *D B'*.

On peut donner naissance à un milieu dont la densité aille en croissant de bas en haut. Il suffit de remplir une caisse de charbons ardens; les gaz produits dans la combustion sont d'abord très-dilatés et conséquemment très-légers. Mais à mesure qu'ils s'élèvent, ils se refroidissent et se condensent. On obtient un décroissement inverse en

mettant dans un verre, d'abord de l'acide sulfurique concentré, et ensuite de l'eau; si l'on colle sur un point du verre une petite bande de papier, et que l'on regarde à travers le liquide, on la verra également double.

464. On a observé depuis long-temps un phénomène naturel, connu sous le nom de *mirage;* il est analogue à ce qui précède.

Le phénomène du mirage se produit souvent en Egypte; pendant le milieu de la journée, les rayons d'un soleil ardent ont élevé la température d'un sol formé de sable, dont la capacité pour la chaleur est très-faible. La couche, en contact avec le sol, prend aussi une température élevée et se dilate assez pour acquérir une densité moindre que celle des couches supérieures. L'atmosphère présente alors des densités croissantes du sol à une certaine hauteur. Les rayons qui arrivent des objets sous un angle assez faible, donnent naissance à la courbe (*fig.* 304). L'observateur aperçoit deux images, l'une droite et dans le lieu de l'objet, l'autre renversée A' B' et inférieure à l'image directe A B. Le soir et le matin le terrain ayant une température ordinaire, l'aspect du pays n'offre rien de particulier; les objets paraissent dans le lieu qu'ils occupent réellement; mais au milieu de la journée, le terrain semble terminé par une inondation générale; les différens objets, les villages entiers paraissent être au milieu des eaux. Sous chaque village on voit son image renversée comme elle paraîtrait au milieu d'un lac. A mesure qu'on avance, les limites de cette inondation s'éloignent; enfin elle disparaît totalement. Cette illusion est souvent cruelle dans le désert, parce qu'elle présente l'image de l'eau dans le moment où l'on en aurait le plus grand besoin (Monge).

MM. Biot et Mathieu ont fait, dans leur séjour près de Dunkerque, des observations sur le mirage. (*Voyez* les Mémoires de l'Institut, 1809.)

On a quelquefois occasion d'observer ce phénomène en mer; il est moins fréquent et y a moins de durée.

Il s'est présenté sur le lac de Genève à MM. Jurine et Soret.

Décomposition de la lumière.

465. Jusqu'ici nous avons regardé la lumière comme composée de faisceaux simples; cette supposition est très-éloignée de la réalité, la lumière qui nous vient du soleil, et de tous les corps lumineux, est formée de sept couleurs principales qui sont le violet, l'indigo, le bleu, le vert, le jaune, l'orangé et le rouge. Chacun de ces faisceaux porte en soi une couleur primordiale, et d'autres qualités qui lui sont propres. Du mélange de ces sept faisceaux naissent toutes les couleurs présentées par la nature et les arts; de leur réunion résulte la blancheur.

Grimaldi avait aperçu la décomposition de la lumière opérée par le prisme; mais c'est réellement Newton qui, par un choix heureux d'expériences confirmatives les unes des autres, l'a démontrée de la manière la plus complète. Commençons par reconnaître l'inégale *réfrangibilité* des couleurs différentes. Pour cela il nous suffira de regarder à travers l'angle réfringent d'un prisme droit de verre, bien net, une bande de papier horizontale dont une moitié est peinte en rouge et dont l'autre est peinte en bleu. On reconnaîtra, si le sommet de l'angle réfringent du prisme est en haut, que la bande bleue est plus haute que la bande rouge; pour comprendre que cette

séparation est une suite de l'inégale réfrangibilité des deux couleurs, il faut tracer la marche de chacune. Soit *CAB* (*fig.* 305), la section verticale du prisme, *A* son angle réfringent, c'est-à-dire l'angle à travers les faces duquel s'effectue le passage de la lumière. Soit *S I* un rayon parti de la bande rouge. Ce rayon éprouvera à son entrée dans le prisme une réfraction qui le rapprochera de la perpendiculaire *N N'* puisqu'il passe de l'air dans le verre, en *I'*, il s'écartera de la perpendiculaire et prendra la direction *I' O*; de sorte que l'œil placé en *O* croira l'objet en *S'*; mais il est facile de voir que le déplacement de l'objet sera d'autant plus grand que la réfraction sera plus grande. Si donc la couleur bleue se réfracte plus que la couleur rouge, la bande bleue sera plus élevée, ce qui a lieu en effet.

466. La conséquence qui se tire naturellement de cette expérience est évidente : si la lumière blanche est composée de rayons inégalement réfrangibles, leur séparation s'opérera à travers le prisme, et la décomposition de la lumière solaire sera démontrée.

Pour réaliser cette expérience, pratiquez au volet d'une chambre obscure une petite ouverture de 2^{mm} de diamètre; placez un prisme sur le passage d'un faisceau solaire *S I* (*fig.* 306) et dans une position telle que son axe soit perpendiculaire à la direction du faisceau; vous remarquerez que l'image reçue sur un carton *M N* est beaucoup agrandie dans le sens *M N*, parce que la réfraction du prisme s'exerce dans ce sens, qu'elle est terminée par deux lignes droites et par deux arcs de cercle; que le violet est la couleur la plus réfrangible; que le rouge est celle qui l'est le moins, et que l'ordre de réfrangibilité

est le suivant, violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé et rouge. Cette image a reçu le nom de spectre solaire. La cause de la forme de l'image est visible; en effet, tous les rayons rouges du faisceau ayant une même réfrangibilité doivent former une image rouge circulaire. Il doit en être de même des rayons orangés, etc., ces différentes images superposées ont leurs centres sur une même ligne droite perpendiculaire à la direction du prisme. Le spectre qui résulte de la réunion de toutes ces images, doit donc être terminé latéralement par deux lignes droites parallèles, et à ses deux extrémités supérieure et inférieure par deux arcs de cercle; tandis que, si toute la lumière jouissait de la même réfrangibilité, le spectre se présenterait sous l'aspect d'une image circulaire qui serait déplacée par l'effet de la réfraction, mais qui ne serait nullement altérée dans ses dimensions. En effet, supposons que, dans une certaine position, l'angle PIA (*fig.* 307) soit égal à l'angle $BE'O$; dans ce cas, les angles CIE et $CE'I'$, complémens des angles de réfraction, sont aussi égaux et l'égalité des angles $CI'E'$ et CEI en est une conséquence. On a donc aussi $QI'A = OEB$. D'où $QI'A - PI'A = OEB - OE'B$. Mais $OEB - OE'B$ est l'angle EOE' sous lequel on aperçoit l'objet PQ à travers le prisme. $QI'A - PIA$ est l'angle PHQ sous lequel on l'aperçoit sans l'interposition du prisme. Or ces deux angles sont égaux; la grandeur de l'objet ne serait donc pas changée par le prisme si tous les rayons avaient la même réfrangibilité.

467. Vous pouvez par une expérience synthétique confirmer l'analyse précédente; recevez le spectre solaire à une certaine distance du prisme sur une lentille conver-

gente, vous verrez que l'image produite à son foyer est tout-à-fait blanche.

Les rayons qui appartiennent à chaque cercle sont tous également réfrangibles, car la réfraction à travers un, deux ou même trois prismes n'augmente nullement le nombre des faisceaux; chaque couleur reste la même, seulement la plus réfrangible est la plus déviée. Ainsi, si l'on reçoit le spectre vertical produit par le passage d'un rayon solaire à travers un prisme horizontal sur un second prisme vertical, on obtiendra un spectre oblique, dont la partie violette sera la plus écartée.

La figure 308 donne la position de la seconde image par rapport à la première. Si le second prisme est parfaitement égal au premier et incliné sur la lumière incidente de la même manière, son effet sur chacun des rayons sera nécessairement égal à celui du premier prisme; d'où il suit que l'extrémité R' de la nouvelle image sera autant écartée de l'extrémité R de la première que celle-ci l'était de l'image directe C. On aura donc $RR' = RC$; de même $VV' = VC$. Le triangle $VV'C$ est isocèle et la seconde image est inclinée à la première de 45 degrés.

Tout cela est conforme à l'expérience.

468. La disposition des couleurs dans le spectre solaire où l'on voit le vert entre le jaune et le bleu, l'orangé entre le rouge et le jaune; le souvenir de ce qui se pratique dans les arts, où le mélange du jaune et du bleu est employé pour donner le vert, où l'orangé est souvent formé aussi par la réunion du rouge et du jaune, avait fait penser à quelques savans que l'orangé et le vert du spectre étaient formés par la superposition des deux couleurs, en-

tre lesquelles chacune de ces couleurs se trouve placée dans le spectre. Il est vrai que, si l'on réunit par une lentille le jaune et le rouge du spectre, on a l'orangé; qu'on obtient de la même manière le vert par la réunion du jaune et du bleu. Mais il y a cette différence essentielle entre ce vert et cet orangé, et les mêmes teintes données immédiatement par le spectre, que celles-ci sont tout-à-fait inaltérables, indivisibles; tandis que le vert et le jaune artificiels sont séparés par le prisme en leurs couleurs élémentaires.

469. L'apparence présentée par les objets blancs, vus à travers le prisme, trouvera son explication dans ce qui précède; en effet, supposons que l'angle réfringent du prisme soit en haut, que l'axe soit horizontal, et qu'on examine à travers le prisme une bande infiniment mince de papier blanc, l'effet du prisme dans cette position est, comme nous l'avons vu (*fig.* 305), de relever l'image; les rayons les plus réfrangibles seront les plus déviés, ainsi l'on apercevra un spectre dont la partie supérieure sera violette et la partie inférieure rouge. Les autres couleurs seront disposées dans l'ordre que nous avons reconnu. Supposons maintenant qu'au lieu d'une bande élémentaire, on examine une feuille de papier de plusieurs pouces de largeur. La partie supérieure offrira toujours le violet, la partie inférieure le rouge; tandis que le milieu ne présentera que du blanc. Le bord supérieur de la bande donnera un spectre, il en sera de même de toutes les bandes élémentaires dont la feuille est composée; la partie violette de la bande supérieure sera tout-à-fait isolée, ainsi que la partie rouge de la bande inférieure; le violet de la seconde bande pourra se mêler au rouge de la première, et ainsi

de suite, de sorte qu'on ne devra apercevoir que du blanc résultant du mélange de toutes ces couleurs.

Inégale réflexibilité des rayons.

470. Pour reconnaître l'inégale réflexibilité des différens rayons, Newton fit tomber un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, perpendiculaire sur la face *A C* d'un premier prisme *B A C*, dont les angles *C* et *B* étaient de 45° (*fig.* 309); le faisceau suivait sa route en ligne droite jusqu'en *I*; là, une portion réfléchie allait frapper la face *A B* aussi dans une direction perpendiculaire; ce rayon allait rencontrer un second prisme *P N Q*, et comme l'incidence était oblique à la face d'entrée *NP*, il y avait dispersion, et le spectre rejeté vers la base allait se peindre en *R' V'* sur un carton disposé à cet effet; maintenant, en faisant tourner le prisme *A B C* de manière à diminuer l'angle d'incidence *C I O*, et en conséquence à augmenter la réflexion sur la face *A B*, il remarquait que la partie violette du spectre *R' V'* devenait plus intense, tandis que la partie correspondante du spectre *R V* produite sur un carton par la portion de lumière réfractée en *I* s'affaiblissait; qu'ensuite le même fait avait lieu pour la couleur indigo, etc., et qu'enfin la lumière rouge était la dernière à se réfléchir totalement en *I*. Ainsi il est démontré que le violet, rayon le plus réfrangible, est aussi le plus réflexible, et que l'ordre de réflexibilité est le même que l'ordre de réfrangibilité. (*Voyez* l'optique de Newton.)

Propriétés calorifiques des rayons.

471. C'est à Rochon, physicien ingénieux (*Recueil de*

Mémoires sur la physique et la mécanique), qu'on doit les premières observations sur ce sujet; il reconnut en 1775 que les différens rayons produisaient sur le thermomètre des degrés de chaleur différens. Dans ses expériences un faisceau de lumière élémentaire allait frapper un thermomètre après s'être condensé par son passage à travers une lentille convergente. D'après les expériences de Rochon, le rayon rouge possède la propriété d'échauffer au plus haut degré; le rayon violet est celui qui échauffe le moins; il a assigné pour le rapport celui de 8 à 1.

Le célèbre astronome Herschell a trouvé 7 à 2 pour le même rapport. Il a de plus remarqué que la faculté d'échauffer avait la même limite que le spectre du côté du rayon violet, qu'elle augmentait progressivement depuis le violet jusqu'au rouge, qu'elle existait même dans des rayons insensibles à l'œil, moins réfrangibles que les rayons lumineux, et enfin que son maximum répondait à un demi pouce au-delà des rayons rouges. (*Bibliothèque britannique*, 15.) M. Leslie a répété les expériences déjà faites par Rochon et Herschell avec un instrument qu'il nomme photomètre (mesure de lumière). Cet instrument est représenté dans la figure 308 : il est formé comme le thermomètre différentiel par un tube de verre qui a la forme d'un siphon renversé, mais dont une des branches est plus longue; c'est la partie à laquelle est fixée la boule destinée à mesurer les effets calorifiques; cette boule est d'émail noir. Ce petit instrument est renfermé sous une cloche en verre très-mince, afin de le défendre de l'action des courans d'air; il offre un grand avantage pour les recherches du genre de celles dont il s'agit ici, c'est d'être insensible aux variations de la température du milieu en-

vironnant. M. Leslie a aussi reconnu que le rayon rouge échauffe plus que le rayon violet; le rapport est, selon lui, de 16 à 1, mais il n'a pas aperçu de rayons calorifiques obscurs au-delà des limites du spectre; M. Bérard est d'accord sur ce point avec M. Leslie.

Propriétés chimiques des différens rayons.

472. La lumière solaire exerce une action puissante sur les phénomènes chimiques; la présence de la lumière nécessaire à la formation de la matière verte des végétaux, et du composé de chlore et d'oxide de carbone, son action sur le chlorure d'argent, en sont des preuves assez manifestes.

L'analogie nous conduit à demander si cette propriété réside au même degré dans tous les rayons. Déjà Schéele (*Traité chimique de l'air et du feu*, p. 78 et 98) avait remarqué que le rayon violet opérait plus promptement qu'aucun autre rayon, la réduction de l'oxide d'argent. Senebier faisait ensuite une remarque semblable relative au développement de la matière verte des végétaux.

D'après MM. Wollaston, Ritter et Bockmann, l'action chimique s'étendrait même au-delà du rayon violet, hors de la limite du spectre.

Les expériences de M. Bérard, dans lesquelles ce physicien a exposé, soit du chlorure d'argent, soit un mélange de chlore et d'hydrogène, aux différens rayons, concentrés par une lentille convergente, confirment pleinement les résultats des physiciens que nous venons de citer. Pour donner une idée de l'accroissement de l'intensité chimique vers la partie violette, il suffira de rap-

porter que du chlorure d'argent tenu pendant deux heures dans la lumière rouge ainsi condensée, n'éprouvait pas d'altération sensible, tandis qu'en moins de cinq minutes il se colorait assez fortement dans la partie violette. M. Bérard a aussi constaté l'existence de rayons chimiques invisibles au-delà des rayons violets.

D'après les expériences de M. Arago, des rayons lumineux dirigés de manière à donner de l'obscurité par leur interférence, n'exercent plus aucune action chimique.

Propriétés magnétiques.

473. M. Morichini, professeur de chimie à Rome, avait annoncé en 1813 (*Annalen der physick*, t. XLVI, *von Gilbert*) que de petits barreaux d'acier acquéraient la vertu magnétique par l'action des rayons violets. Ce résultat n'a pas été confirmé par les recherches de M. Configliachi de Pavie et de M. Bérard de Montpellier. On a annoncé, en 1826, que madame Sommerville, en exposant au soleil des barreaux d'acier, enveloppés en partie par des rubans violets, les avait mis dans un état de magnétisme sensible, etc. Ces expériences n'ont pas encore été constatées à Paris.

Propriétés éclairantes.

474. Si les expériences d'Herschell sont confirmées par des expériences ultérieures, le rayon jaune possède le maximum de clarté, le rayon vert jouit à peu près au même degré de cette propriété qui a ensuite une dégradation insensible jusqu'au violet où se trouve le minimum. Newton avait déjà, dans son optique, donné des résultats peu différens.

475. Les résultats que nous venons de rapporter sur les propriétés des différens rayons de la lumière solaire ont fait naître deux opinions : selon l'une, il existerait trois espèces de rayons, de sorte que le spectre devrait être considéré comme l'assemblage de trois spectres superposés; selon l'autre, les actions chimique et calorifique seraient réunies dans les mêmes rayons à celle qui produit la sensation de la lumière et des couleurs.

D'après la première opinion, la chaleur et la lumière constitueraient deux fluides différens, tandis que d'après la seconde on les considérerait comme des modifications d'un même fluide. L'état actuel des connaissances ne permet pas de décider laquelle des deux opinions doit être adoptée; il convient dans des questions de ce genre de s'en rapporter aux faits observés et d'attendre les progrès ultérieurs de la science.

476. M. Frauenhofer, en examinant le spectre solaire à l'aide d'une forte lunette, y a découvert une multitude de lignes transversales plus brillantes que la masse générale du spectre, et différentes dans les diverses couleurs en nombre comme en intensité. Ce savant s'est assuré que la nature, l'angle réfringent et la position du prisme n'avaient aucune influence sur l'existence de ces lignes. Il a également reconnu ces lignes dans les deux faisceaux provenant de la subdivision d'un même rayon par un cristal doué de la double réfraction. La cause de la formation de lignes, inaperçues avant M. Frauenhofer, n'est pas encore assignée.

DE LA VISION.

Structure de l'œil.

477. L'œil est logé dans une cavité qu'on appelle *orbite;* il présente plusieurs membranes dont les deux plus extérieures déterminent sa forme sensiblement sphérique : l'une, qui occupe le fond de l'œil, se nomme *sclérotique*, ou *cornée opaque*, à cause de la nature de sa substance qui ressemble à celle de la corne; l'autre, beaucoup plus mince, d'un diamètre et d'une étendue moindres, enchâssée dans la sclérotique, et formant la partie antérieure de l'œil, a reçu le nom de *cornée transparente*.

A la face interne de la cornée opaque est une membrane cellulo-vasculaire, renfermant une matière colorante assez foncée (*fig.* 311). On l'appelle *choroïde;* cette partie de l'organe contribue à la netteté de la vision, en absorbant toute la lumière qui tombe sur sa surface (1). Enfin sur la choroïde se trouve appliquée la *rétine*, membrane blanchâtre, transparente et mince. La rétine chez l'aigle, le vautour, etc., est plissée. On pense généralement que c'est sur elle que s'opère la sensation.

Vers l'endroit où la cornée opaque s'unit à la cornée

(1) La choroïde est plus foncée en couleur chez les habitans de la zône torride, que chez les peuples du Nord (Home). Elle n'existe pas chez les animaux ruminans, et chez les oiseaux de nuit.

transparente, la choroïde se détache et se divise en deux lames; la première, qui est antérieure, produit cette couronne colorée, appelée *iris*, qui à son centre présente une ouverture connue sous le nom de prunelle. La seconde lame se nomme *couronne ciliaire*.

L'iris est un assemblage de fibres musculaires, les unes orbiculaires et rangées autour de la prunelle, les autres dirigées vers son centre : l'usage de ces fibres est de rétrécir la prunelle pour modérer l'impression d'une lumière trop vive, et de la dilater pour laisser entrer avec plus d'abondance une lumière faible.

L'iris arrête les rayons qui s'écartent trop de l'axe; sa position dans l'œil a l'avantage de laisser entrer une plus grande quantité de lumière qu'elle ne le ferait, si elle était placée dans la cornée transparente, puisque l'humeur aqueuse faisant converger les rayons lumineux, détermine à entrer dans la prunelle des rayons, qui iraient tomber sur l'iris s'il n'y avait pas de réfraction dans l'humeur aqueuse ou si l'iris était placé sur la cornée transparente.

L'iris, disposé comme un diaphragme dans l'œil, affaiblit l'aberration de sphéricité du cristallin (1); et ce qui est bien remarquable, c'est que la disposition des couches dont ce dernier est formé, concourt au même but; en effet on a reconnu qu'elles augmentent de puissance réfractive, de la circonférence au centre où se trouve le noyau le plus dense et le plus réfringent.

La couronne ciliaire tient enchâssé un corps solide,

(1) *Voyez* plus loin, A[illegible]tion de sphéricité.

diaphane, *I V*, qui a la forme d'une lentille convergente; c'est ce qu'on appelle le *cristallin*. Il est plus plat en avant qu'en arrière, et s'aplatit de plus en plus avec l'âge.

La partie antérieure de l'œil, comprise entre la cornée transparente et le cristallin, est remplie d'une liqueur diaphane, semblable en apparence à de l'eau et qu'on appelle *humeur aqueuse*.

Dans la cavité postérieure située derrière le cristallin, se trouve une liqueur semblable à du verre fondu, et qu'on nomme *humeur vitrée*. Dans la figure 311, *A B* représente la cornée opaque; *C D* la cornée transparente; *E F* la choroïde; *H K* la rétine; *I V* le cristallin; *U* l'humeur aqueuse; *M* l'humeur vitrée (1). (*Voyez* pour plus de détails *les ouvrages d'anatomie et de physiologie.*)

---

(1) Voici les rapports entre les sinus d'incidence et les sinus de réfraction par le passage de la lumière de l'air dans la substance :

Eau pure	1,3358
Humeur aqueuse	1,3366
Humeur vitrée	1,3394
Enveloppe extérieure du cristallin	1,3767
Centre du cristallin	1,3990

M. Brewster (*Ann. ch. et ph.*, t. 11).

M. Chossat trouve le même rapport égal à 1,338 pour l'humeur vitrée.

Selon le docteur Wollaston, le rapport croît de 1,380 à 1,447 de la circonférence au centre du cristallin.

Il résulte aussi des recherches de M. Chossat, que la cornée et les faces du cristallin (œil de bœuf) sont des segmens d'ellipsoïde. (*Ann. ch. et phys.*, t. 10.)

D'après M. Chossat, les humeurs de l'œil des animaux (poissons, quadrupèdes et oiseaux), auraient une puissance réfractive sensiblement plus forte que chez l'homme. (*Ann. ch. et phys.*, t. 8, p. 217.)

Marche des rayons dans l'œil.

478. On appelle axe de l'œil la ligne suivant laquelle il se dirige pour voir nettement les objets.

L'action de l'œil est analogue à celle de la réunion de plusieurs lentilles. En effet, soit *A* (*figure* 312) un point qui envoie des rayons lumineux à l'œil; ces rayons arriveront sur la cornée transparente avec un certain degré de divergence. A leur entrée dans l'humeur aqueuse, leur divergence diminuera. Le cristallin est convexe, et plus réfringent que l'humeur aqueuse, il rapprochera encore les rayons. Enfin, comme l'humeur vitrée est moins réfringente que le cristallin, et que la surface qui reçoit les rayons est concave, elle tend aussi à augmenter leur convergence. Toutes les parties de l'œil contribuent donc à faire concourir sur la rétine les rayons divergens qui arrivent du même point d'un objet.

479. Les rayons lumineux venus des objets éloignés tombent sur la cornée transparente, pénètrent à travers l'humeur aqueuse, le cristallin, l'humeur vitrée, et viennent se concentrer sur la rétine, où ils forment une petite image renversée des objets.

Soit *A B* (*fig.* 313) un objet situé au-devant de l'œil; du point *B* il partira des rayons qui, après leur passage à travers les diverses parties de l'œil, iront concourir en *b'*. Les rayons partis de *A* iront se réunir en *a'*; de sorte que l'image de l'objet sera renversée. L'inspection seule de la figure prouve qu'il ne peut pas en être autrement.

Le renversement des objets dans le fond de l'œil peut être constaté; l'expérience réussit parfaitement avec un œil de bœuf dont on amincit la cornée opaque. Si

l'on présente à un œil frais et ainsi préparé, une petite bougie, on voit, en se plaçant par derrière, une image renversée de la bougie, peinte sur le fond de l'œil. L'observation est même plus facile en opérant, comme l'a fait M. Magendie, sur des yeux de lapins albinos, car les yeux de ces animaux sont dépourvus de choroïde, et la partie postérieure de l'œil jouit d'une assez grande transparence.

Netteté de la vision à différentes distances.

480. D'après la ressemblance qui existe entre l'œil et une chambre obscure, la possibilité de voir nettement les objets à des distances différentes, paraît tenir à la faculté de changer ou la distance entre le cristallin et la rétine, ou la courbure du cristallin et de la cornée transparente, ou l'ouverture de la prunelle.

1°. Certains anatomistes ont cru que l'œil jouissait de la faculté de s'allonger; mais l'examen de cet organe ne fait pas découvrir les muscles nécessaires pour que cet allongement soit produit.

De plus, il est aisé de démontrer que cet allongement n'a pas lieu; car, dans ce cas, vu la faible compressibilité des humeurs qui remplissent l'œil, la forme de la cornée transparente ou de la conjonctive devrait changer; or, quand on examine, à l'aide du microscope, une image réfléchie par l'œil d'une personne en même temps qu'on lui présente deux objets inégalement distans, on n'a perçoit pas la plus petite variation ni dans la grandeur, ni dans la portion de l'image réfléchie. (Th. Young, Olbers.)

D'un autre côté, si l'on met devant l'œil un tube de verre cylindrique, rempli d'eau, qui s'appuie sur lui, et

dont l'autre extrémité soit fermée par une lentille biconvexe, l'humeur aqueuse ayant la même densité que l'eau, il est clair que les rayons dans leur passage de la deuxième dans la première, ne devront éprouver aucune déviation, de sorte que leur marche sera indépendante de la courbure de la cornée transparente. Cet appareil ne modifie nullement la formation des foyers des rayons visuels, puisqu'il n'affaiblit pas la faculté de voir à différentes distances. (Thomas Young.)

2°. Examinons l'explication qui aurait pour base quelqu'altération du cristallin. On sait que cette lentille présente à une dissection délicate, un grand nombre de couches très-minces. M. Young admettant avec quelques anatomistes, l'analogie du cristallin avec les muscles, suppose que chaque couche voisine possède une certaine contractibilité; en sorte que, dans cette manière de considérer le cristallin, le gonflement qui accompagne la contraction d'un muscle, augmenterait la convexité du cristallin, et conséquemment diminuerait la distance focale. Cette diminution dans la distance focale expliquerait la vision nette à différentes distances, plus petites que la distance ordinaire de la vision. Mais une expérience de ce même physicien est contraire à sa conjecture. En effet, M. Young n'a pu faire varier la distance focale d'un cristallin, par un courant d'électricité. D'ailleurs, ce qui exclut toute hypothèse qui aurait pour base le déplacement ou l'altération du cristallin, c'est que la perte de cette partie de l'œil par l'opération de la cataracte, n'entraîne pas la perte de la faculté de voir à différentes distances. Des individus privés du cristallin voient encore distinctement entre des limites assez écartées, par

exemple à sept pouces, et à une distance double. Bien entendu que ces individus doivent faire usage d'un verre convergent.

3°. Une explication qui a réuni assez de partisans, est celle qui a été proposée par La Hire. D'après ce savant, l'iris peut, par sa contraction, laisser entrer des rayons plus ou moins divergens. On conçoit que l'ouverture de la prunelle diminuant d'étendue, la vision puisse être encore nette, quoique le foyer ne soit plus sur la rétine. On sait d'ailleurs que, dans la chambre obscure, on peut distinguer assez bien les objets inégalement éloignés. La vision peut donc être nette, quoique l'image ne tombe pas exactement sur la rétine. Cette théorie est appuyée par une expérience concluante. Si l'on place un corps très-près de l'œil, on le voit confusément, mais on le voit nettement aussitôt qu'on interpose entre l'œil et l'objet une carte percée d'un trou. Le papier qui arrête les rayons s'écartant de l'axe, le foyer n'est pas aussi éloigné de la rétine, et l'image est moins confuse. Il existe certainement pour chaque individu une distance déterminée, à laquelle la vision est la plus nette. Mais l'invariabilité de l'œil ne paraît pas, d'après ce qui vient d'être dit, incompatible avec la faculté de discerner les objets inégalement distans.

4°. M. Vallée suppose que les rayons lumineux décrivent dans l'humeur vitrée des courbes, en se rapprochant de l'axe optique jusqu'à ce que leur mouvement lui soit parallèle. Cette hypothèse suppose une variation de densité de l'humeur vitrée, depuis le cristallin jusqu'à une certaine distance de la rétine, ce qui n'est pas parfaitement prouvé. M. Lehot (*Mémoire sur la vision*) a vu

peut-être une explication satisfaisante de l'unité d'impression (*fig.* 314).

Usage des lentilles pour remédier aux défauts de la vue, chez les presbytes et les miopes.

Voyez le n° 458.

483. Les personnes qui font usage des lunettes ordinaires, ne voient distinctement que les objets situés dans l'axe de la vision. La vision sur les bords est toujours incertaine, à cause des grandes réfractions que les rayons y subissent.

Depuis quelques années on a substitué des menisques aux verres soit biconvexes, soit biconcaves; c'est M. Wollaston qui a proposé l'emploi de ces verres qu'il a appelés *périscopiques*, à l'aide desquels on voit nettement les objets placés très-obliquement. Si ces verres doivent remplacer les lentilles convergentes on leur donne la forme *A* (*fig.* 315) dont la partie antérieure a la plus grande courbure; les verres destinés à remplacer les lentilles divergentes ont la forme *A'*, celles-ci ont la partie antérieure moins courbe. La forme de ces verres périscopiques, montre que les rayons obliques, comme ceux qui arriveront dans la direction de l'axe, tomberont sous des incidences à peu près normales aux surfaces du verre. L'expérience a prouvé en faveur de l'heureuse invention de M. Wollaston. (*Bullet. de la Société phylom.*, 1813.)

484. Une expérience de Mariotte, que chacun peut répéter, indique que la rétine ne présente pas la même sensibilité dans toute son étendue, et même que le point de l'insertion du nerf optique en est tout-à-fait dépourvu. En

effet, si l'on place deux objets à deux pieds de distance l'un de l'autre environ, et qu'on s'en éloigne ensuite peu à peu, en dirigeant l'œil droit sur l'objet qui est à gauche et en face duquel on se trouve, à la distance de neuf pieds on cessera de voir l'autre objet, qui reparaîtra si on continue de s'éloigner. (Mariotte, p. 496.)

485. La sensation produite sur la rétine a une durée appréciable; on le prouve en faisant tourner un corps chauffé au rouge; lorsque le mouvement a un certain degré de rapidité, on croit apercevoir une ligne circulaire rouge; de même, si l'on fait tourner un carton circulaire sur lequel sont peintes les sept couleurs du prisme, le carton paraît blanc.

La sensibilité de l'œil s'émousse par la durée et par la répétition d'une même sensation; au bout d'un certain temps il devient inhabile à la percevoir. Par exemple, si, après avoir fixé la vue long-temps sur un objet d'un rouge vif, on porte ses regards sur un carton blanc, l'œil devenu insensible à l'action de la couleur rouge, ne sera affecté que par les autres couleurs; de sorte que le carton blanc paraîtra verdâtre; l'illusion n'a pas une longue durée. En général la couleur que l'on aperçoit est complémentaire de celle qu'on a regardée d'abord, c'est-à-dire que réunie avec elle, elle produit le blanc; c'est là ce qu'on entend par *couleurs accidentelles*.

Appréciation de la distance.

486. Nous jugeons de la distance d'un objet par l'angle que font les deux axes optiques dirigés sur un même point de cet objet. A mesure que l'objet s'approche ou s'éloi-

gne, les yeux changent leur figure et leur direction de manière à faire toujours concourir les deux axes optiques vers le même point de l'objet. La comparaison fréquente de la distance des objets avec le mouvement des yeux, nous a donné l'habitude de juger de la distance par les impressions liées à ces mouvemens. Mais si nous n'employons qu'un œil, nous ne déterminons que très-imparfaitement les distances; par exemple, avec un seul œil on parvient difficilement à enfiler un anneau suspendu de manière que l'on ne puisse pas en voir l'ouverture. Et même des personnes, privées d'un œil depuis long-temps, ne jugent les distances qu'imparfaitement.

Estimation de la grandeur.

487. On appelle *angle visuel* l'angle *A o B* (*fig.* 313) formé par deux rayons qui, partant des extrémités d'un objet, viennent se croiser dans la prunelle. La considération de cet angle est importante relativement aux phénomènes de la vision. Derrière l'angle *A o B*, il s'en forme un autre *a o b*, qui provient des mêmes rayons réfractés à travers les humeurs de l'œil. Cet angle *a o b* soutend l'image *a b*, sur le fond de l'œil; il est visible qu'il augmente et qu'il diminue en même temps que l'angle *A o B*.

On appelle *grandeur apparente* d'un objet, l'ouverture de l'angle visuel; d'où l'on voit que la grandeur réelle est constante, tandis que la grandeur apparente varie continuellement avec la distance. Ainsi, le concours des deux yeux est nécessaire pour apprécier les distances, tandis qu'un seul œil suffit pour estimer la grandeur.

Nous ne jugeons nullement de la grandeur réelle des

objets par la seule grandeur apparente ; nous tenons compte de la distance, parce que les expériences que nous avons faites avec le secours du tact, nous ont appris à apprécier exactement les dimensions et les distances des objets. Ainsi une ligne de huit mètres, vue à un mètre de distance, ne nous paraîtrait plus avoir que 2 mètres à la distance de 4 mètres; mais combinant la distance avec la grandeur apparente, nous rendons à l'objet sa grandeur réelle. Il faut dire que, lorsque les objets sont très-éloignés, la petitesse des angles visuels et des angles formés par les axes optiques, empêche les comparaisons, et l'on juge de la grandeur réelle par la grandeur apparente. Alors les objets paraissent plus petits qu'ils ne sont réellement.

A l'appui des considérations précédentes, sur l'influence de l'habitude, nous rapporterons un exemple frappant. Un jeune homme âgé de 13 ans, aveugle de naissance, auquel M. Chelseden venait de faire l'opération de la cataracte, pensait que tous les objets touchaient ses yeux; il ne pouvait concevoir que des tableaux représentassent des corps solides, etc. Ce ne fut qu'après plusieurs mois d'expériences qu'il jugea des formes, des grandeurs et des distances.

Illusions d'optique.

488. Un observateur placé à l'extrémité d'une longue avenue formée de deux rangées d'arbres parallèles, les voit converger à l'autre extrémité, parce que les intervalles entre deux arbres correspondans, soutendent des angles qui deviennent de plus en plus petits. C'est par une cause semblable qu'étant à l'entrée d'une longue galerie, le parquet paraît aller en s'élevant et le plafond en s'abaissant.

On explique encore très-bien pourquoi une pièce d'eau semble s'élever pour un observateur placé à l'une de ses extrémités : cet observateur compare le plan de la surface de l'eau, à un plan horizontal passant par l'œil. De même, si l'on se trouve au pied d'une haute tour, elle paraît penchée, parce que l'on compare la position de cette tour à une verticale passant par l'œil; de même encore, un terrain élevé *a b* nous paraît plus long que dans le cas où il serait de niveau avec l'horizon (*fig.* 316). Une ligne droite très-étendue paraît courbe. Placé parallèlement à l'un des côtés d'un polygone régulier, on croit ce côté plus grand que ceux qui sont obliques.

Les astres paraissent plus petits au zénith qu'à l'horizon. Les objets placés à la surface de la terre nous permettant de mieux apprécier la distance, nous croyons l'astre plus éloigné, et, comme il soutend dans notre œil le même angle dans les deux cas, il doit paraître plus grand à l'horizon. Le brouillard nous fait voir les objets plus éloignés que dans un temps serein, parce qu'il nous les fait voir moins éclairés.

Les illusions produites par les corps en mouvement sont aussi très-nombreuses. En général, si nous faisons des mouvemens sans nous en apercevoir, nous les rapportons en sens contraire aux objets qui nous environnent. C'est ainsi qu'étant tranquilles sur un bateau qui se meut, nous voyons les objets environnans se mouvoir en sens contraire. C'est encore par une illusion de ce genre qu'on attribue au soleil le mouvement diurne de la terre, etc.

Si nous courons vers un objet très-éloigné, et sensiblement immobile, nous voyons cet objet courir avec nous.

Telle est la théorie de la vision admise aujourd'hui. Nous ne nous dissimulons pas qu'elle a été attaquée dans divers ouvrages.

DE L'ARC-EN-CIEL.

489. L'Arc-en-ciel, par la variété et la magnificence de ses couleurs, semble inviter le physicien à rechercher les causes de sa production.

Ce météore n'apparaît que sous deux conditions indispensables, la présence du soleil sur l'horizon, et la résolution d'un nuage en pluie : de plus il faut pour qu'un observateur l'aperçoive, qu'il ait le dos tourné au soleil et qu'il soit placé entre cet astre et le lieu où tombe la pluie, afin que la lumière directe n'efface pas la faible lumière réfléchie par le nuage.

On aperçoit presque toujours deux arcs. Les deux arcs offrent les couleurs du spectre. Dans l'arc intérieur en commençant par le haut, les couleurs sont dans l'ordre : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo et violet. Dans l'arc extérieur, l'ordre des couleurs est inverse.

Assez rarement on aperçoit un troisième arc.

Avant qu'on connût la composition de la lumière, il était impossible de donner une explication complète de l'arc-en-ciel; conséquemment la théorie de ce phénomène ne peut dater que de Newton; cependant Descartes en avait eu une idée très-nette. En effet, il avait bien vu la marche des rayons lumineux dans les gouttes de pluie; il avait bien vu que parmi tous les rayons qui pénètrent dans ces gouttes, il n'y a que ceux qui tombent sous un certain angle qui puissent revenir au spectateur sans s'affaiblir; il avait même fait l'expérience, en recevant dans une chambre

obscure des rayons solaires sur un matras plein d'eau qu'il élevait et abaissait à volonté (1).

490. Voyons la marche de la lumière : nous supposerons d'abord le soleil réduit à un point. Nous n'aurons besoin de considérer que ce qui se produit dans le plan passant par l'astre, le centre de la goutte et l'œil de l'observateur. Soit un faisceau solaire *S I* (*fig.* 317). A son incidence en *I*, une portion pénétrera dans la goutte, et se réfractera à la manière ordinaire. En *I'*, il se fera une nouvelle séparation, une portion sortira, une autre se réfléchira et ira frapper la goutte en *I''*, et ainsi de suite. La lumière réfractée en *I''* peut rencontrer l'œil de l'observateur placé en *O*. La position de ce dernier, relativement au soleil, montre que la lumière qui n'a subi que deux réfractions est perdue pour lui.

Le rayon émergent en *I''*, éprouve une dispersion tout-à-fait pareille à celle qu'il subit à la sortie du prisme; les deux rayons extrêmes sont marqués *I''R* et *I'' V*.

L'œil recevra dans le plan que nous avons considéré, un mélange de rayons, de sorte que la sensation sera confuse, et de plus l'impression sera faible à cause de la dilatation du faisceau, et de la perte faite dans le passage de la lumière à travers la goutte.

Il faut donc pour que l'œil ait une sensation vive des diverses couleurs, que chacune d'elles offre un faisceau de rayons non divergens, mais parallèles à leur émergence; ce sont ces rayons qui ont été appelés *efficaces*.

---

(1) Il paraît que long-temps avant Descartes, le frère Théodoric, en 1300, expliquait l'arc-en-ciel. (*Ann. ch. et phys.*, t. 6.)

491. On peut découvrir, soit par l'expérience, soit par le calcul, sous quelles conditions les rayons efficaces se produisent. Voyons d'abord l'expérience, nous reprendrons ensuite le calcul.

Si l'on fait tomber un certain nombre de rayons de lumière sur une goutte d'eau sphérique (*fig.* 318), et qu'on cherche l'angle de déviation, c'est-à-dire l'angle formé par le rayon incident et le rayon perçu par l'observateur, on trouvera qu'il est nul sous l'incidence perpendiculaire; ensuite qu'il augmente jusqu'à une certaine limite d'incidence égale à environ 59° 30 pour les rayons rouges. Cette déviation est 42°, 1′, 40″, pour une seule réflexion intérieure.

Des rayons peu éloignés et parallèles, tombant sous cette incidence sur la goutte, en sortiront encore parallèles, quoique la déviation générale du faisceau soit de 42 degrés.

On conçoit donc que l'œil, placé à une grande distance de la goutte, ne soit affecté que par ces rayons, puisque ces derniers, vu leur parallélisme, ont conservé leur intensité, tandis que les autres se sont affaiblis par la dilatation.

492. Si l'on suppose une suite de globules disposés circulairement à côté les uns des autres, de manière à former la base d'un cône dont le soleil occupe le sommet, un observateur placé sur l'axe, pourra recevoir à la fois de tous ces globules des rayons colorés; la bande circulaire ainsi formée aura une certaine largeur à cause de l'ouverture de la prunelle.

Nous avons trouvé 59°, 30′ pour l'incidence qui donne

le maximum de déviation dans le cas d'une seule réflexion intérieure des rayons rouges. Nous trouverions pour le maximum de déviation des rayons violets 40°, 16′ sous l'incidence 58°, 40′; les couleurs intermédiaires donneraient des déviations comprises entre 42° et 40°.

Par la valeur des angles de déviation, on voit pourquoi la partie inférieure de l'arc est violette, et la partie supérieure rouge. Ce sera le contraire pour deux réflexions; en effet, dans ce dernier cas les angles de déviation sont : 50°, 58′ pour les rayons rouges, et 54°, 9′ pour les rayons violets (1).

---

(1) *Calcul de l'angle d'incidence correspondant au maximum ou au minimum de déviation.*

Soit un rayon SI (*fig.* 319) qui, après la réfraction dans la goutte d'eau, prenne en I, la direction DA; l'angle de déviation D sera égal à $2r - 2i + 180$; i étant l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction. En effet, la somme des quatre angles du quadrilatère $CIDI'$ est égale a quatre droits; de plus, les angles i et i' sont égaux à cause de la symétrie de la figure; il en est de même de r et r'; on aura donc

$$D + 2i + 180° - 2r = 2.\ 180°$$

$$\text{ou } D = 2r - 2i + 180°.$$

Dans la figure 320 qui représente le cas de deux réfractions séparées par une réflexion intermédiaire, où ICI'' est double de ICI', on aura

$$D + 2i + 2(180 - 2r) = 2.\ 180 \text{ ou}$$

$$D = 4r - 2i \ldots (a).$$

La loi des valeurs de D est évidente; après n incidences intérieures, la valeur de l'angle de déviation sera

$$D = 2nr - 2i - (n - 2)\ 180 \ldots (b).$$

Il serait trop long de mettre dans ces deux formules (a) et (b), les différentes valeurs de l'angle d'incidence i et les valeurs correspondantes de l'angle de réfraction r pour les sept couleurs. Il sera beaucoup plus commode de rechercher la valeur de l'angle d'incidence correspondante au

Il résulte de ce qui précède, que la figure 321 représente fidèlement l'aspect de l'arc-en-ciel. Le soleil supposé à l'infini est en S, le spectateur en O et la pluie en $v\,r$, $v'\,r'$.

On conçoit très-bien l'immobilité de l'arc-en ciel malgré la chute continuelle des gouttes de pluie, puisque les gouttes étant remplacées par d'autres qui occupent les mêmes positions, c'est comme si les premières étaient immobiles.

---

maximum ou au minimum de l'angle de déviation. Pour la découvrir, il faudra appliquer à chacune des expressions a et b les conditions analytiques du maximum ou du minimum, ce qui se fera en égalant la différentielle de chaque expression à zéro.

L'expression (a) donnera $2\,d\,r - d\,i = o$, mais la différentielle de $\sin i = t \sin r$, donne $d\,i \cos i = t\,d\,r \cos r$.

Substituant dans cette dernière à $d\,i$ sa valeur $2\,d\,r$, on a $2 \cos i = t \cos r$, ajoutant le carré de cette équation au carré de $\sin i = t \sin r$, on a $\cos^2 i + \sin^2 i = t^2$, d'où $\cos i = + \sqrt{\frac{t^2-1}{3}}$.

En opérant de la même manière sur l'équation (b) on aura

$$\cos i = + \sqrt{\frac{t^2-1}{n^2-1}} \; (c).$$

Si l'on donne à n successivement les valeurs 2, 3, etc., on aura les valeurs des angles d'incidence qui correspondent aux angles de déviation maximum et minimum, et conséquemment aux rayons efficaces.

Par exemple, pour deux incidences intérieures, on fera $n=2$ dans (c), ce qui fournira l'angle d'incidence i. Par le rapport de réfraction, on aura r, enfin en mettant $n=2$ et les valeurs de i et de r dans (b), on aura D. Les résultats de ces calculs sont rapportés dans le n° 493.

APPLICATION DES FORMULES TROUVÉES DANS LA NOTE CI-JOINTE.

493. 1° *Deux incidences intérieures* (*fig.* 320) $n = 2$.

Rayons rouges. $l = \frac{102}{81}$, $i = 59°, 23', 30''$
d'où $r = 40°, 12', 10''$,
$D = 42°, 1', 40''$.

Rayons violets. $l = \frac{102}{81}$, $i = 58°, 40', 30''$,
d'où $r = 39°, 24', 20''$,
$D = 40°, 10', 40''$.

2°. *Trois incidences intérieures* (fig. 322) $n = 3$.

Rayons rouges. $l = \frac{108}{81}$, $i = 71°, 49', 55''$
d'où $r = 45°, 26', 50''$
$D = -50°, 58', 50''$

Rayons violets. $l = \frac{102}{81}$, $i = 71°, 26', 10''$
d'où $r = 44°, 47', 10''$
$D = -54°, 9', 20''$.

Le signe négatif de la valeur de D, indique que l'angle a son ouverture tournée en sens opposé, comme le montre la figure.

L'arc produit par deux incidences, doit être inférieur puisque l'angle de déviation est plus petit que celui produit par trois incidences (*fig.* 321).

L'ordre des couleurs doit être inverse, puisque pour l'arc intérieur la déviation des rayons étant moindre que celle des rayons violets, c'est le contraire pour l'arc supérieur.

Dans le troisième arc, l'ordre des couleurs serait le même que dans le premier, et ainsi de suite.

Largeurs des deux arcs.

494. La ligne $S\,O\,A$ étant parallèle à la direction des rayons solaires $S\,v$ ou $S\,v'$ (à cause de la distance immense de cet astre), les angles $A\,O\,v$, $A\,O'r$ sont égaux aux angles $S\,v\,O$ et $S\,r\,O$, comme alternes internes (*fig.* 321).

La largeur apparente de l'arc intérieur est donc la différence entre les valeurs de l'angle de déviation pour les rayons rouges et violets, c'est-à-dire 1° 45′.

La largeur apparente de l'arc extérieur est 3° 10′.

La distance apparente entre les deux arcs est 8° 57′.

Telles devraient être effectivement les dimensions et les distances des deux arcs si le soleil n'était qu'un point; mais cet astre a un diamètre apparent de 30′ environ. Il suit de là que si nous considérons les arcs, ci-dessus déterminés, comme produits par les rayons émanés du centre du disque solaire, les rayons émanés des bords ou de l'intérieur formeront autant d'arcs pareils; seulement l'axe de chacun de ces nouveaux arcs sera une ligne menée de l'observateur au point du disque d'où ils seront émanés; en sorte qu'il y aura au-dessus et au-dessous des arcs précédens, des arcs de 15′ de largeur. Ainsi la largeur de ces arcs sera augmentée de 30′, ce qui portera la largeur de l'arc intérieur à 2° 15′; celle de l'arc extérieur à 3° 40′, et enfin la distance des deux arcs sera réduite à 8° 27′.

La superposition de ces arcs partiels doit rendre les couleurs moins tranchées; en effet elles ne sont jamais bien nettes que sur les bords où il n'y a pas de mélange. Nous ajouterons que ces dimensions déterminées par

le calcul, sont conformes à celles que donne l'observation.

495. La partie visible de l'arc n'est pas toujours la même. Lorsque le soleil est à l'horizon, l'arc apparaît sous la forme d'un demi-cercle; à mesure que le soleil s'élève, l'axe de la vision, qui est en même temps celui du cône formé par les rayons efficaces, s'abaisse, de sorte que l'arc va en diminuant; e[illegible]érieur disparaît quand le soleil est à 42° a[illegible]'horizon; l'arc extérieur ne cesse d'être visib[illegible] la hauteur du soleil est de 54°.

Il est encore fa[illegible]evoir qu'un observateur placé sur une émine[illegible] le soleil est à l'horizon, peut apercevoir même un cercle entier.

DES PRINCIPAUX INSTRUMENS D'OPTIQUE.

496. L'histoire des instrumens ne nous présentera pas de nouveaux principes d'optique, ce ne sera en quelque sorte qu'une application des propriétés des miroirs et des lentilles.

Les principaux instrumens d'optique sont la loupe, ou le microscope simple, le microscope solaire, le mégascope, la chambre noire, le microscope composé, le micromètre, les lunettes astronomique, terrestre et de Galilée, le télescope de Newton, celui de Gregori, la chambre claire, le goniomètre.

Ces instrumens sont de trois espèces:

Première espèce. Instrumens dioptriques composés de lentilles.

Deuxième espèce. Instrumens catadioptriques composés de lentilles et de miroirs.

Troisième espèce. Instrumens catoptriques fondés sur la seule réflexion de la lumière.

Loupe, ou microscope simple.

497. Le microscope simple est d'un grand secours au naturaliste. Beaucoup d'objets placés à la distance ordinaire de la vision distincte échapperaient par leur petitesse à l'observateur le plus attentif; la faible lumière qu'ils enverraient, vu leur degré de petitesse, ne produi-

rait pas dans l'œil une impression suffisante. Soit un petit objet *a b* (*fig* 223); cet objet devrait, pour que sa lumière pût produire une impression sensible dans le fond de l'œil, être placé très-près de cet organe; mais alors les rayons lumineux émanés de chaque point de cet objet, seraient trop divergens, et leur point de concours ne se faisant pas sur la rétine, l'image serait tout à fait confuse. La présence d'une lentille convergente entre l'objet et l'œil, donne aux rayons le degré de divergence qui convient à la vision distincte. De sorte que l'observateur recevant la lumière, sous la même inclinaison sous laquelle elle lui arriverait, d'un objet *a' b'* placé à la distance ordinaire de la vision, croira en effet voir un objet *a' b'*. Le microscope simple permet donc de voir les objets placés à une petite distance, et de plus il les agrandit dans le rapport de *a b* à *a' b'* ou de *o d* à *o D*, c'est-à-dire *sensiblement* dans le rapport de sa distance focale principale à la distance à laquelle l'œil aperçoit nettement les objets.

Ceci demande quelques développemens : *o d* n'est pas tout à fait la distance focale principale, mais la différence est très-faible, puisque, vu le peu d'étendue de l'ouverture de la pupille, les rayons pénètrent sous une divergence qui approche beaucoup du parallélisme.

o D est aussi un peu moindre que la distance de la vision distincte (22 centimètres) puisque l'œil est placé derrière la lentille.

On se procure bien simplement des microscopes pour les très-petits objets; par exemple, percez avec une épingle un petit trou dans une feuille mince de métal, et introduisez-y une goutte d'eau; cette goutte formera des deux côtés de la surface de la plaque, deux convexités sensiblement sphé-

riques. Ces lentilles ont l'inconvénient de se dissiper promptement par l'évaporation. M. Brewster a proposé de substituer à l'eau un vernis transparent. Mais même ce vernis ne se conserve pas sans altération. M. Sivright d'Édimbourg (*An. ch. et ph.*, t. 11) propose de pratiquer dans des feuilles de platine de l'épaisseur des feuilles ordinaires d'étain, plusieurs ouvertures de $\frac{1}{20}$ à $\frac{1}{10}$ de pouce de diamètre, de fondre dans cette ouverture à l'aide du chalumeau, des petits globules de verre. On peut remplacer les feuilles de platine par un fil du même métal. Ces petits microscopes sont d'une construction facile, et ne présentent pas l'inconvénient d'une prompte altération.

Au reste, dans l'optique de Lacaille et dans d'autres ouvrages plus anciens, il est question de microscopes formés par une goutte de liquide introduit dans une ouverture pratiquée dans une lame de métal.

Microscope solaire.

498. Le microscope solaire est formé d'un miroir et de deux lentilles convergentes (*fig.* 324).

Le miroir plan métallique *p q* est destiné à la réflexion de la lumière solaire. La lumière réfléchie par le miroir *p q* est concentrée sur l'objet *a b* par le moyen de la première lentille *m n*, l'objet *a b* doit être placé à son foyer afin de recevoir le plus de lumière possible. Cet objet fortement éclairé se trouve en face d'une seconde lentille *S H*, un peu en deçà du foyer principal *F*, les faisceaux divergens partis de l'objet sont concentrés par cette lentille et donnent sur un carton *a b'* convenablement placé, une image nette et agrandie de l'objet *a b;*

la mobilité du carton permet de le mettre dans la position de la plus grande netteté de l'image. L'image sera d'autant plus grande que l'objet sera plus près du foyer principal, qu'il ne peut jamais dépasser, puisqu'au-delà il n'y aurait pas d'image produite. On est donc le maître de faire varier la grandeur de l'image; l'expérience est piquante lorsque l'objet *a b* est une tranche mince de fromage ou une goutte d'un liquide en putréfaction, on aperçoit alors sur le carton des figures d'animaux qui par leurs mouvemens, leur formes bizarres, présentent un spectacle fort curieux. Il faut se rappeler que le miroir plan *p q* et la lentille *m n* sont fixés au volet d'une chambre obscure; le miroir plan doit être mobile afin qu'on puisse faire arriver la lumière parallèlement à l'axe de la lentille *m n*; il serait encore plus commode de remplacer le miroir *m n* par un héliostat. (*Voyez* cet instrument.)

Nous supposons ici que l'objet soit transparent : s'il était opaque, il faudrait l'éclairer de côté.

Mégascope.

499. Le mégascope ne diffère d'un microscope solaire qu'en ce qu'il est destiné à l'examen des objets d'assez grande dimension, tandis que le microscope sert spécialement à l'étude des objets dont les dimensions sont peu étendues.

Placez en *a b* (*fig.* 325) un peu au-delà du foyer principal d'une lentille convergente, un objet renversé, éclairez cet objet par le moyen d'un ou plusieurs miroirs, disposez dans la chambre obscure un carton ou un verre dépoli, vous verrez l'objet s'y peindre dans sa situation

naturelle, vous pourrez agrandir l'image d'autant plus que vous rapprocherez davantage l'objet *a b* de la lentille, sans toutefois dépasser le foyer principal *F*.

Cet instrument a été proposé par M. Charles; il peut avoir un grossissement de 1 à 20 fois. Ce mégascope peut être d'une grande utilité dans certaines recherches. C'est à l'aide de cet instrument que M. Chossat a déterminé les courbures des diverses parties de l'œil.

La lanterne magique diffère peu du mégascope; les objets y sont éclairés par des lampes, et de plus, l'ensemble est portatif. La fantasmagorie est une lanterne magique, où l'on rapproche et l'on éloigne l'objet de la lentille convergente, de manière à faire varier la grandeur de l'image; on produit ainsi l'effet de l'éloignement ou du rapprochement. Il faudrait seulement, pour que l'illusion fût complète, que la lumière variât aussi dans son intensité.

Chambre obscure.

500. La marche de la lumière dans la chambre obscure, est la même que dans les deux instrumens que nous venons de décrire.

Une chambre obscure est formée d'une caisse en bois à laquelle on adapte un lentille convergente (*fig.* 526). Les objets extérieurs viennent se peindre dans le fond de la chambre, dans une position renversée, et sous des dimensions très-petites en comparaison des dimensions réelles. Comme la chambre obscure sert particulièrement à l'art du dessin, on redresse les images en les recevant sur un miroir plan *m n* incliné de 45°. L'image est alors en *a'' b''* sur un verre dépoli, de manière qu'un observa-

teur dont le regard est dirigé vers l'objet *a b*, voit cette image dans une situation droite. Au lieu d'une lentille biconvexe, on peut employer des lentilles concaves vers les objets, et convexes vers l'image. Cette nouvelle forme des lentilles produit des images plus nettes. (Wollaston.)

On donne aussi quelquefois une autre forme aux chambres obscures (*fig.* 327).

J'ai vu chez M. Chevallier (Vincent aîné) des chambres obscures de cette dernière forme, dans lesquelles on a substitué à la lentille et au miroir, un prisme convexe-concave. La partie convexe est tournée vers les objets, et la partie concave qui fait un angle droit avec elle, est tournée vers le papier sur lequel va se peindre l'image. Cette chambre obscure remplace avec avantage les anciennes chambres.

Microscope composé.

501. Le microscope composé (*fig.* 328) est formé d'une première lentille *m n* tournée vers l'objet, appelée lentille objective, ou simplement objectif; d'une seconde lentille *P R* placée près de l'œil et qu'on a nommée par cette raison, oculaire. La plus simple lunette réunit toujours au moins un objectif et un oculaire.

Nous tracerons d'abord la marche de la lumière dans le microscope composé, nous indiquerons ensuite quelques dispositions particulières suggérées par la pratique.

Soit *b a* un petit objet placé devant la lentille *m n* au-delà du foyer des rayons parallèles *F*; cet objet produira une image renversée en *a' b'*, d'autant plus grande que l'objet sera plus rapproché du foyer *F*, et qui pourra être reçue sur un verre dépoli ou sur une toile légère;

mais on l'agrandit encore par le moyen d'un oculaire, qui n'est autre chose qu'une loupe. De sorte que l'objet est ainsi grossi et par l'objectif et par l'oculaire.

On a $ab : a'b' :: oc : co'$ ou $a'b' = \frac{co' \times ab}{co}$, voilà le grossissement produit par l'objectif; il sera d'autant plus considérable, que l'objet ba sera plus près de F; en effet, plus l'objet ba est près de F, plus la distance co' du foyer conjugué est grande. L'image $a'b'$ vue à travers l'oculaire sera agrandie dans le rapport de $o'k$, qui est sensiblement la distance focale principale de cet oculaire, à kl distance de la vision nette et distincte.

Ainsi $a'b' : a''b'' : ko' :: kl$, d'où $a''b'' = \frac{a'b' \times kl}{ko'}$, ou

$$a''b'' = \frac{co' \times kl}{co \times ko'} \times ab.$$

Le grossissement est d'autant plus grand, que l'objectif et l'oculaire ont un plus court foyer; mais ce grossissement a une limite, vu la difficulté de construire régulièrement de très-petites lentilles et la nécessité de conserver à l'oculaire d'assez grandes dimensions. Le champ du microscope composé, c'est-à-dire l'espace que la vision peut embrasser à travers les lentilles qui le composent, se trouve borné par les rayons qui rencontrent les bords de l'oculaire.

502. Le microscope est généralement composé de trois tuyaux, emboités les uns dans les autres (*fig.* 329).

Au tuyau supérieur AB est fixé l'oculaire PR; ce premier tuyau s'appelle *porte-oculaire;* il glisse à frottement dans la pièce CD, celle-ci peut à son tour glisser dans un tuyau plus large FH; au bas de ce dernier est fixée la

lentille objective *m n*. Voilà pourquoi on l'appelle *porte-objectif*. On dispose en *I K* un diaphragme circulaire d'un diamètre connu. On fait mouvoir le porte-oculaire jusqu'à ce qu'on voie avec beaucoup de netteté le diaphragme qui est alors placé au point où devront être amenées par la réfraction, les images des objets qu'on veut observer. Au-devant de l'objectif il y a un anneau circulaire; cet anneau est double et reçoit une lame de verre *S T*; c'est sur cette lame de verre qu'on place les objets. La construction de l'instrument permet d'approcher ou d'éloigner l'anneau de l'objectif.

503. On détermine le grossissement du microscope de la manière suivante : On glisse entre les deux parties de l'anneau, une lame de verre à divisions très-petites; on enfonce la pièce intermédiaire *C D* jusqu'à ce que la règle de verre soit vue avec netteté; alors l'image est contenue dans le diaphragme *I K*; soit *n* le nombre de divisions de la règle que l'action de la lentille rend suffisant pour couvrir le diamètre du diaphragme, soit *m* le nombre de divisions de la même valeur que renferme réellement ce diamètre, le grossissement sera $\frac{m}{n}$. Quant au grossissement de l'oculaire, il se calculera comme nous l'avons indiqué au commencement de cet article.

Il est nécessaire d'éclairer fortement les objets qu'on veut observer; s'ils sont transparens, on les éclaire par-dessous au moyen d'un miroir concave *V*; s'ils sont opaques, on les éclaire par-dessus. Dans tous les cas, un miroir concave *V'*, percé au-dessous de la lentille *m n*, et nécessairement placé à son centre, renvoie la lumière sur les objets.

(*Voyez* après les télescopes, pour la description d'un microscope catadioptrique.)

L'instrument que nous venons de décrire est le plus simple de tous les microscopes composés.

504. Les microscopes les plus en usage sont à trois verres. La figure 330 représente un de ces instrumens.

Sans la lentille intermédiaire m' n', l'image produite par l'objectif m n irait se rassembler en a' b'; tandis qu'elle est concentrée en a'' b''. Par le moyen de l'oculaire, elle est vue en a''' b'''; elle est renversée, comme dans le microscope à deux verres. Delbarre a exécuté des microscopes dont les oculaires étaient composés de cinq lentilles.

M. Selligues a présenté à l'Académie des Sciences un microscope dont la lentille objective est composée de quatre lentilles achromatiques à deux verres, et superposées; dans cet instrument les objets sont éclairés par un prisme convexe. M. Chevallier (Vincent aîné) en a présenté un à la Société d'encouragement, construit suivant les données d'Euler, c'est-à-dire, ayant une lentille achromatique à deux verres, et un oculaire à deux verres. Comme il serait difficile dans les forts grossissemens de construire des lentilles achromatiques d'un très-court foyer, M. Chevallier superpose deux lentilles de quatre lignes de foyer, ce qui équivaut à une lentille de deux lignes de foyer.

M. Amici, savant italien, a récemment rendu sensible le mouvement du suc de la chara, à l'aide d'un microscope construit par lui, et dont l'objectif était formé par deux lentilles achromatiques composées chacune de trois verres, et qui comportait une grande ouverture avec une

grande force amplifiante. Les personnes qui ont vu cet instrument, ont avoué ne connaître rien de comparable. M. Amici, avant son départ de Paris, s'est entendu avec un habile opticien de la capitale pour l'exécution de son précieux instrument.

505. M. Brewster a fait servir le microscope composé, à la mesure des indices de réfraction d'un grand nombre de substances liquides et de substances à demi solides, comme la cire, etc. Pour mettre ce procédé en pratique, 1° il place en avant de la lentille objective un verre plan très-mince, et dispose l'instrument de manière à voir nettement le micromètre; 2° il introduit entre la lentille et le verre plan la substance dont il veut connaître l'indice de réfraction; il presse le verre plan contre la lentille si la substance est solide. Les substances qui, comme le caoutchouc, l'assa-fœtida, etc., dans l'état ordinaire, présentent peu de transparence, en acquièrent, étant réduites en lames très-minces, une assez grande pour fournir des images parfaitement nettes. L'interposition de la substance augmente nécessairement la distance à laquelle l'image se forme derrière la lentille, en sorte que si on laisse le micromètre dans le même point, il faut allonger le tuyau du microscope, ou bien, si l'on conserve au microscope sa longueur, il faut augmenter la distance de l'objet. La valeur de cet allongement dépend de la nature de la substance et de la courbure de la lentille. M. Brewster, dans ses expériences, laisse le microscope dans une position constante, et il ne fait varier que la distance de l'objet. La figure 331 représente l'appareil.

M. Brewster a mesuré, à l'aide de ce procédé, les indices de réfraction d'un gra[illegible]nbre de substances. Les

valeurs numériques sont rapportées dans son ouvrage, p. 253 (1).

M. Cauchois a fait quelques essais avec l'appareil de M. Brewster; les résultats qu'il a obtenus ont été assez d'accord avec ceux qu'avaient fournis d'autres procédés.

Lunette astronomique.

506. La lunette astronomique est la plus simple de toutes les lunettes; elle est, comme le microscope composé, formée de deux lentilles (un objectif et un oculaire) (*fig.* 332); mais dans la lunette astronomique, l'objectif a un foyer très-long; c'est le contraire dans le microscope.

Cet instrument est entièrement destiné à l'examen des corps célestes; c'est ce qui lui a fait donner le nom qu'il porte. Les astronomes emploient spécialement cette lunette dans leurs observations ordinaires.

Soit PS un objet très-éloigné, il ira former une image renversée $S'P'$ au foyer principal de la lentille objective A, puisque, vu la grande distance des corps célestes et la petitesse de l'ouverture de la lunette, les rayons lumineux qui partiront d'un même point de l'objet, approcheront beaucoup du parallélisme.

L'image $P'S'$ se trouve au foyer de la lentille oculaire, de sorte que l'œil placé en O au concours des faisceaux $S'N$ et $P'M$ verra l'astre renversé.

Voyons maintenant comment on peut déterminer le

---

(1) Euler avait déjà songé au moyen de mesurer les puissances réfractives des substances diaphanes fluides, en les renfermant entre deux ménisques, et en déterminant la distance focale de la lentille ainsi composée. Le fils de ce célèbre géomètre a mis cette méthode en pratique.

grossissement de la lunette, ou le rapport entre l'angle sous lequel l'objet est vu à l'œil nu, et l'angle sous lequel on le voit à l'aide de cette lunette.

A l'œil nu on voit l'objet SP sous l'angle SAP ou son égal $S'AP'$; par le moyen de la lunette on le voit sous l'angle NOM ou son égal $S'CP'$; l'égalité de ces deux derniers angles est une suite de ce que l'image $S'P'$, est au foyer de la lentille MN, et de ce que les deux faisceaux $S'N$ et $P'M$ sont sensiblement parallèles à l'axe. Ces deux faisceaux, après leur passage à travers l'oculaire, iront se croiser au foyer principal; ce qui entraîne l'égalité des deux triangles $CS'P'$ et NOM, et par suite celle des angles NOM et $S'CP'$.

Les angles $S'AQ'$ et $S'CQ'$, moitiés des angles $S'AP'$ et $S'CP'$ sont comme leurs tangentes $\frac{S'Q'}{AQ'}$ et $\frac{S'Q'}{CQ'}$, ou comme CQ' et AQ'; mais CQ' et AQ' sont les distances focales principales de l'oculaire et de l'objectif. Ainsi la grandeur de l'objet vu à l'œil nu, est à la grandeur de cet objet vu dans la lunette, comme la distance focale de l'oculaire est à la distance focale de l'objectif.

L'oculaire étant convenablement placé pour une bonne vue, devra être rapproché de l'objectif pour une vue courte, afin de rendre divergens les rayons qui entraient dans l'œil sensiblement parallèles. Pour une vue longue, l'oculaire devra être éloigné.

On voit que le grossissement est d'autant plus grand, que l'oculaire a une distance focale plus petite; mais ce grossissement a une limite pour plusieurs raisons, et entre autres, parce qu'à mesure qu'il augmente, les images sont moins brillantes.

Au foyer de l'objectif on place ordinairement trois ou cinq fils verticaux très-fins, d'araignée, d'argent ou de platine, également distans et coupés à leur milieu par un fil horizontal. La plaque de métal qui porte ces fils est mobile, afin qu'on puisse amener le centre O des fils dans l'axe optique. Cet appareil est nécessaire aux astronomes pour observer les passages des astres au méridien, quand la lunette est placée dans le méridien même.

Quelquefois on place encore au foyer un fil qui se meut parallèlement au fil horizontal au moyen d'une vis. Cet appareil, que l'on nomme *micromètre*, sert à mesurer par l'écart des deux fils parallèles le diamètre des astres.

Lunette terrestre, ou lunette à quatre verres.

597. La lunette astronomique présente un inconvénient qui n'en permet pas l'emploi dans l'observation des objets terrestres, puisqu'elle les fait voir renversés. Cet inconvénient est léger dans les recherches astronomiques.

Pour les objets terrestres, on redresse l'image en ajoutant deux autres verres (*fig.* 333.)

Soit un objet terrestre $S\,P$; il donnera une image renversée $P'\,S'$, que l'œil peut apercevoir en O sous l'angle O ou sous l'angle C son égal; l'instrument ainsi disposé ne serait que la lunette précédente. On ajoute deux autres lentilles B et E; la lentille E est tellement disposée que le point O en est le foyer, les deux faisceaux lumineux partant du foyer sortiront parallèlement à l'axe; mais comme les rayons qui composent chaque faisceau sont parallèles, ils devront sortir convergens, concourir au foyer K et

donner une image redressée P'' S''. On regarde cette image avec un oculaire.

Les quatre lentilles sont placées dans un tuyau composé de trois parties mobiles, l'objectif et l'oculaire sont chacun dans un tuyau séparé; les deux lentilles intermédiaires C et E sont liées ensemble dans un même tuyau. L'inspection seule de la figure fait concevoir la nécessité de toutes ces dispositions.

D'abord on voit que la première image doit être placée au foyer de la lentille C, mais cette image étant d'autant plus rapprochée de l'objectif A, que l'objet sera plus éloigné : la lentille C doit être mobile; de plus, comme le point de croisement des faisceaux en O est le foyer commun des lentilles E et C, ces deux lentilles sont nécessairement liées ensemble. Si la distance de la vision distincte était la même chez tous les hommes, l'oculaire pourrait être lié aux deux lentilles C et E; mais la diversité des vues exige qu'on puisse approcher ou éloigner la lentille B de l'image S'' P''.

Calculons le grossissement de la lunette terrestre. A l'œil nu, on verrait l'objet sous l'angle SAP ou $S'AP'$; par la seconde lentille, on le voit déjà sous l'angle VOU ou $S'CP'$. Le grossissement des deux premières lentilles sera dans le rapport de ces angles; si nous appelons A l'angle SAP, et C l'angle $S'CP'$ ou son égal VOU, nous aurons, comme dans le n° précédent, $C = A \times \frac{AQ'}{CQ'}$; mais $P''ES''$ est égal à l'angle NOM ou VOU; et comme, en dernier résultat, c'est sous l'angle D ou sous son égal B qu'on aperçoit l'image, il faut avoir la valeur de ce dernier, ce qu'on obtient par la proportion

tang B : tang E :: EK : BK, d'où tang $B = \frac{EK}{BK} \times$ tang E, ou en prenant les angles pour leurs tangentes et remplaçant l'angle E par son égal C, $B = A \times \frac{AQ' \times EK}{Q'C \times BK}$. Les distances focales des deux lentilles intermédiaires étant ordinairement égales, cette expression se réduit à $A \times \frac{AQ'}{BK}$; d'où il suit que le grossissement est le même que pour la lunette astronomique. Cette dernière lunette est préférée par les astronomes, 1° parce qu'elle absorbe moins de lumière; 2° parce qu'elle a un plus grand champ; 3° parce qu'elle peut supporter un oculaire d'un plus court foyer.

Lunette de Galilée.

508. La lunette astronomique fait voir les objets renversés; la lunette terrestre absorbe une quantité de lumière considérable; de sorte que ni l'une ni l'autre ne sont d'un usage commode pour apercevoir les objets terrestres peu éclairés. Qu'on change la lentille convergente de la lunette astronomique en une lentille divergente, on aura une lunette qui aura le double avantage de n'occasioner qu'une faible perte de lumière, et de faire voir les objets dans leur situation naturelle. Telle est la lunette de Galilée ou lorgnette d'opéra.

Un objet éloigné PS (*fig.* 334), ira se peindre en $P'S'$; si l'on y place un carton, ou si l'on reçoit cette image sur un oculaire, comme dans la lunette astronomique (n° 506), on la verra renversée; mais elle sera redressée si, avant l'image $P'S'$, on fixe une lentille diver-

gente B. Alors chaque faisceau sera dévié et éloigné de l'axe, de sorte qu'il faudra que l'œil soit placé tout près de l'oculaire pour recevoir la lumière. La courbure de la lentille concave est telle, que la lumière qui en sort a le degré de divergence convenable à la vision distincte.

Il est évident que l'objet paraîtra droit, puisque le point S' sera vu en S'' et le point P' en P''.

Le grossissement est le même que celui de la lunette astronomique. A l'œil nu on verrait l'objet sous l'angle $P\,A\,S = P'\,A\,S'$; dans la lunette de Galilée on le voit sous l'angle $F\,O\,G = S'\,B\,P'$. Or les deux angles $P'\,A\,S'$ et $S'\,B\,P'$, reposant sur le même côté $S'\,P'$, sont entre eux comme $B'\,Q$ et $A\,Q'$, c'est-à-dire comme les distances focales de l'oculaire et de l'objectif. Nous supposons que $B\,Q'$ soit la distance focale principale de l'oculaire. En effet les deux faisceaux P' et S' sont sensiblement parallèles dans la longueur de la distance $B\,Q'$. Le foyer O est donc le foyer des rayons parallèles. En conséquence $B\,Q'$ est la distance focale principale.

Le champ de la lunette de Galilée est déterminé par l'ouverture de la prunelle; il a peu d'étendue, l'œil doit être placé fort près de l'oculaire.

L'oculaire de cette lunette, comme celui de la lunette astronomique, doit être rapproché de l'objectif pour les myopes, et éloigné pour les presbytes.

Galilée a fait avec sa lunette plusieurs découvertes importantes, telles que celles des taches du soleil, des satellites de Jupiter, des phases de Vénus, etc.

Télescopes.

509. Les télescopes sont des instrumens composés de

miroirs combinés de manière à produire par la réflexion de la lumière, des images distinctes; ces images sont vues à travers un oculaire.

Le plus simple des télescopes est celui qui a servi à Herschell à faire toutes les belles découvertes qui ont enrichi l'astronomie dans ces derniers temps. Il est formé d'un grand miroir qu'on présente à l'astre dans une position inclinée, l'inclinaison du miroir permet à l'observateur de voir, par le moyen d'une loupe, l'image produite à côté de l'axe; la perte de lumière est peu considérable puisque la réflexion n'a lieu que sur un seul miroir; elle est plus grande dans les télescopes suivans où la lumière est réfléchie deux fois.

510. Newton avait imaginé un télescope peu différent du précédent; seulement l'axe du miroir était dirigé vers l'astre, et l'image réfléchie latéralement par un miroir plan, et vue ensuite à travers une loupe (*fig.* 335).

On peut remplacer le miroir plan par un prisme placé de manière à produire sur une de ses faces la réflexion totale.

Dans ce télescope l'image est plus affaiblie que dans le précédent, à cause d'une réflexion de plus.

L'image P' S' de l'objet P S placé à une distance infinie, se forme au foyer principal. (*Voyez* n° 434).

Le miroir plan ne fait que changer la direction de la lumière sans altérer, le moins du monde, les dimensions de l'image. Pour calculer le grossissement, il suffira de faire remarquer qu'à la vue simple l'astre serait aperçu sous l'angle $P\,C\,S = P'\,C\,S'$, tandis que dans la lunette il est aperçu sous l'angle $m\,o\,n = P'\,H\,S'$.

Qu'on suppose, pour plus de simplicité, que la loupe

oculaire soit placée en H, ce qui ne change pas le grossissement; on verra que les deux angles $P' C S'$ et $P' H S'$ sont entre eux comme les distances focales $H R$ et $C R$. Ce grossissement est le même que dans le télescope d'Herschell.

511. Gregori avait, quelques années avant Newton, fait connaître un télescope composé de deux miroirs concaves et d'une lentille. Ce télescope fut découvert avant 1663: Newton ne s'occupa de l'instrument que nous venons de décrire que vers 1666. Voici la description du télescope de Gregori, perfectionné par Jean Halley en 1719.

Dans le télescope de Gregori, les objets sont vus droits, tandis qu'ils sont renversés dans celui de Newton. Le grand miroir $m n$ (*fig* 336) est percé en son milieu d'un trou, dans lequel on place l'oculaire. Devant le grand miroir, et au-delà de l'image, est placé un second miroir $r q$ beaucoup plus petit que le premier; ce second miroir redresse l'image. Les rayons réfléchis par le grand miroir $m n$ forment une image $F H$; les rayons qui la composent se réfléchissent sur le petit miroir $q r$ et donnent en $F' H'$ une seconde image qu'on regarde au moyen de l'oculaire.

Il est évident que la perte de lumière est la même dans les télescopes de Gregori et de Newton.

Les petits télescopes sont rarement employés dans les observations; on leur préfère les lunettes ordinaires. Mais les grands télescopes conservant beaucoup de lumière sont employés avec avantage dans les observations des astres qui ont peu d'éclat; car jusqu'à présent on n'a pas pu construire des lunettes astronomiques assez grandes pour ces sortes de recherches.

Cassagrain a remplacé le petit miroir concave du télescope de Gregori, par un miroir convexe, afin que les aberrations de sphéricité produites par les deux miroirs se compensassent mutuellement. Dans le télescope de Cassagrain, la première image ne se forme pas réellement, puisqu'elle doit tomber au-delà du petit miroir entre son foyer principal et sa surface (n° 436).

Le grossissement du télescope de Gregori ne se trouve que par un calcul assez compliqué (1).

---

(1) *Calcul du grossissement dans le télescope de Gregori.*

AB l'objet (*fig.* 337).

C le centre du grand miroir zx.

e le centre du petit miroir pq.

F le foyer du grand miroir.

g le foyer du petit miroir.

On fait $CF = F$, et $vg = f$.

L'objet à l'œil nu serait vu sous l'angle ACB. Désignons cet angle par G. L'objet est vu, dans le télescope, sous l'angle ofo', ou sous son égal mli. Désignons-le par γ. Le grossissement sera $\frac{\gamma}{G}$. Changeons cette expression en une autre composée de quantités dont les valeurs soient connues, par les distances focales des miroirs et de la lentille oculaire.

Les triangles CFn et Fen donnent les proportions $\frac{Fn}{FC} : \frac{Fn}{Fe} :: FCn : Fen :: Fe : FC$. $Fe = ev - vF = 2vg - vF$; pour avoir la valeur de vF, il faut remarquer que le point F, foyer du grand miroir, est entre le centre e, et le foyer g du petit miroir. Les rayons partis divergens de l'image Fn, iront former, après leur réflexion sur le miroir pq, une seconde image im sensiblement au foyer de la lentille oculaire. On a, par le n° 436, l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}$; et en mettant pour p, p', r, leurs valeurs dans la figure 336, on a

$$vF = \frac{vi \times ve}{2vi - ve} = \frac{vi \times 2vg}{2vi - 2ve} = \frac{2(F+f)f}{2(F+f) - 2f} = \frac{(F+f)f}{F}.$$

Microscope catadioptrique.

512. Le nouveau microscope (*fig.* 338) se compose d'un long tube de cuivre de 12 pouces environ, tenu dans une position horizontale. A une des extrémités A de ce tuyau, se trouve un miroir métallique concave, de forme elliptique. Les foyers de l'ellipse se trouvent l'un, à 2 pouces $\frac{5}{12}$, l'autre à 12 pouces du centre de la surface du miroir. En E est un petit miroir plan, ovale, formé par la section oblique d'un cylindre métallique du diamètre de $\frac{3}{10}$ de pouce. Le milieu de la surface de ce miroir E, correspond à l'axe du grand miroir A, et est éloigné de son centre de $1\frac{1}{2}$ pouce. Les rayons de l'objet vont le frapper immédiatement. Une petite ouverture F laisse passer la lumière de l'objet O; le miroir plan la réfléchit sur le miroir concave A. A l'aide d'une crémaillère R, on place l'objet au foyer

---

(On suppose les mirois tellement placés, que $gF = if$. Ce n'est que dans ce cas que $vi = Vg + gF + Ff - fi = F + f$) : mettant cette valeur de vF dans l'expression précédente, on a $Fe = 2f - \frac{(F+f)}{F}f = \frac{f(F-f)}{F}$. Ainsi $\frac{f(F-f)}{F} : F :: G : neF$, ce qui conduit à $neF = \frac{F^2 G}{f(F-f)}$. Mais les deux triangles iem et lim donnent $il : ie :: mei : mli$. Ou bien en mettant la valeur de $mei = neF = \frac{F^2 G}{f(F-f)}$, et en représentant la distance focale de la lentille oculaire par φ, et faisant attention que $ie = Ff - if + gF - ge = Ff - ge = F - f$, on a $\varphi : F - f :: \frac{F^2 G}{f(F-f)} : \gamma = \frac{F^2 G}{f\varphi}$, d'où $\frac{\gamma}{G} = \frac{F^2}{f\varphi}$. Telle est l'expression du grossissement du télescope de Gregori. (*Voyez* Lacaille, p. 128.) Elle serait plus compliquée sans la supposition de $gF = if$. Mais la valeur numérique serait toujours à peu près la même.

le plus voisin du miroir concave; en sorte que l'image est formée au second foyer *B*. Cette image est vue à l'aide d'un oculaire. On varie le grossissement, en changeant l'oculaire.

Le diamètre intérieur du tube étant 1 $\frac{1}{10}$ pouce, et l'épaisseur du cuivre 1 $\frac{1}{20}$ pouce, l'objet se trouve éloigné du tube d'un demi-pouce, et peut être très-bien éclairé dans toutes ses parties. A cet effet on a disposé un miroir concave en *S'* pour éclairer en dessous, et un autre miroir en *E* percé à son centre pour éclairer au-dessus. Ces deux miroirs sont placés à des distances convenables à l'aide de charnières.

M. Amici regarde son instrument comme supérieur aux meilleurs microscopes dioptriques construits par Adams et Dollond. Il n'a pas eu occasion de le comparer aux microscopes de Utzschneider et Fraunofer; mais il annonce que le grossissement de son microscope est d'un million de fois. (Voyez *An. ch. et ph.*, t. 17.)

On trouve décrits, dans les traités d'optique, des microscopes successivement imaginés par Newton, par Smith, et par Barker; nous avons dû nous borner à un seul instrument de ce genre. En général, dit M. Amici dans son Mémoire, un télescope, quelle que soit sa forme, peut, par un simple renversement, être transformé en un microscope.

GÉNÉRALITÉS SUR LES LUNETTES.

513. Nous aurons à nous occuper dans ce chapitre, 1° de l'aberration de sphéricité; 2° de l'aberration de réfrangibilité; 3° des moyens imaginés pour l'achromatisme.

Aberration de sphéricité.

514. Ce défaut, présenté par tous les instrumens dioptriques, provient de la figure sphérique des verres lenticulaires, qui ne permet qu'aux rayons très-voisins de l'axe de concourir sensiblement en un point commun. Les rayons plus éloignés sont plus réfractés et coupent l'axe en deçà du foyer commun des rayons précédens; il en résulte que le foyer de tous les rayons lumineux émanés d'une même partie d'un objet, n'est pas un point unique. De là naît la confusion dans les images.

Pour corriger l'aberration de sphéricité, et diminuer l'étendue de l'objectif, on place souvent dans l'intérieur des lunettes, *un diaphragme* qui arrête tous les rayons qui viennent du bord de l'objectif.

Aberration de réfrangibilité.

515. Dans l'histoire que nous venons de faire des lentilles et des lunettes, nous avons, pour plus de simplicité, fait abstraction de l'inégale réfrangibilité des rayons. Les images produites par les lentilles qui, dans notre supposition, étaient incolores, sont toujours plus ou moins colorées. Ce défaut est connu sous le nom d'aberration de réfrangibilité. Pour bien concevoir en quoi il consiste, il suffira de faire tomber un rayon *S I* de lumière solaire sur une lentille *M N* (*fig.* 339).

Ce rayon de lumière, comme nous l'avons vu n° 465, est l'assemblage de sept rayons principaux; ne considérons que les deux rayons extrêmes, le moins réfrangible (le rouge), et le plus réfrangible (le violet.) Le premier suivra la ligne *I H R*, le second la ligne *I K V*, les au-

[illegible]

tres rayons [illegible]
ceau et [illegible]
blanc sera [illegible]

C'est [illegible]
Les le[illegible]
déter[illegible]
les objets [illegible]
la diff[illegible]
est i[illegible]
repr[illegible]
me des [illegible]

[illegible]

[illegible]
c[illegible]
sont [illegible]
dér[illegible]
ne [illegible]
qu'on [illegible]
en for[illegible]
tilles [illegible]
sagacité [illegible]
donner [illegible]

D'après [illegible]
sion des [illegible]
que les rayons [illegible]
gus de densités [illegible] verre, pour
revenir ensuite dans l'air, soit que [illegible] ces soient pa
rallèles entre elles, soit qu'elles soient inclinées, et que ce

(1) L'œil ne peut pas être achromatique, puisque toutes ses parties re fractent dans le même sens.

pendant la réfraction de l'un détruise la réfraction de l'autre, de manière que les rayons émergens soient parallèles aux rayons incidens, la lumière sort toujours blanche; et si les rayons émergens sont obliques aux rayons incidens, la lumière prend des couleurs. » (*Optice lucis*, liv. I, part. II.)

C'est cette proposition de Newton qui rendait Dollond si ferme dans la persuasion de l'inutilité des recherches pour la construction des lunettes achromatiques. Mais Kligentierna, célèbre professeur de l'université d'Upsal, ne s'en laissa pas imposer par l'autorité du maître, il fit un Mémoire dans lequel il attaqua, et par le raisonnement et par la géométrie, la proposition de Newton. Dollond refit l'expérience et la trouva fausse.

Dès-lors les géomètres les plus distingués se joignirent aux physiciens pour rechercher les courbures les plus convenables à donner aux objectifs. Voici en peu de mots le résultat de leurs recherches :

Pour bien entendre la construction des objectifs achromatiques, il faut d'abord distinguer la *dispersion* de la *réfraction*.

La réfraction des faisceaux lumineux, est la déviation qu'éprouve le rayon moyen (le vert).

La dispersion est l'excès de la réfraction du rayon le plus réfrangible (le violet), sur celle du rayon le moins réfrangible (le rouge).

Si, comme semblait l'annoncer une expérience de Newton, la dispersion était proportionnelle à la réfraction, l'effet de la dispersion ne pourrait être détruit sans qu'on anéantit en même temps l'effet de la réfraction, c'est-à-dire, qu'il n'y aurait destruction de couleurs que pour

des rayons émergens parallèles aux rayons incidens; le concours des rayons vers l'axe des lentilles n'aurait pas lieu, et en conséquence l'impossibilité de former des objectifs achromatiques serait évidente. Mais l'hypothèse d'une dispersion proportionnelle à la réfraction, est loin d'être conforme à la vérité. On trouve bien qu'en général les substances qui réfractent le plus la lumière, sont aussi celles qui la dispersent davantage; mais ce cas même offre des exceptions. Ainsi le pouvoir dispersif de l'essence de térébenthine, est plus fort que celui du crown glass, tandis que son pouvoir réfractif est moindre.

Le flint glass (cristal), et le crown glass (verre ordinaire), ont à peu près le même pouvoir réfractif; le pouvoir dispersif du premier est au pouvoir dispersif du second dans le rapport de 3 à 2. Ces deux verres sont employés depuis long-temps pour la construction des lunettes achromatiques. Voyons d'abord comment avec deux prismes, on peut former un prisme composé qui réfracte la lumière sans la disperser. C'est là la condition qu'il faut remplir. Soit ce double prisme, *A B C D* (*fig.* 340), le prisme *A B C*, dont l'angle *A* est plus grand que l'angle *C* du prisme *C A D*, est en verre ordinaire, le prisme *C A D* est en cristal; un rayon *S I* de lumière solaire tombant sur la face *A B* du prisme *A B C*, sera réfracté et dispersé; les deux rayons extrêmes, le violet et le rouge sont indiqués par *I R* et *I V*; ces deux rayons sont déviés vers la base du prisme; à leur entrée dans le second prisme *C A D* de cristal dont l'angle est tourné en sens opposé, chaque rayon sera porté vers la base *A D*; mais comme le pouvoir réfractif est à peu près proportionnel à l'angle, il en résulte que le faisceau sera tou-

jours incliné vers la base *B C*; le prisme *C A D* ayant un pouvoir dispersif beaucoup plus grand que celui du prisme *A B C*, pourra, quoiqu'avec un angle plus petit, reporter vers sa base *A D* le rayon violet plus que le rayon rouge, de manière que ces deux rayons repassent dans l'air parallèles entr'eux et conséquemment dans l'état propre à donner une image incolore. D'après cela il sera très-aisé de concevoir les lentilles achromatiques. Soient deux lentilles, l'une biconvexe, l'autre biconcave, accolées l'une à l'autre, et ayant le même axe *A A'* (*fig.* 341). Soit *S I* un rayon de lumière blanche; il sera dispersé dans la première lentille *M N* biconvexe, de manière à donner sept rayons principaux dont les deux extrêmes suivent les directions *I R* et *I V*. La seconde lentille *M N P Q* formée de cristal et ayant un plus petit angle, ne pourra pas détruire complètement la réfraction de la première lentille, et le rayon sera incliné vers l'axe; mais comme le pouvoir dispersif du cristal est beaucoup plus grand que celui du verre ordinaire, le rayon violet sera plus rejeté vers la base *M Q* que le rayon rouge; d'un autre côté comme au passage dans l'air la déviation aura lieu en sens opposé, il est possible de donner aux deux lentilles des courbures telles que le point de concours des rayons soit sur l'axe, et en conséquence qu'il n'y ait qu'un seul foyer; une lentille construite ainsi donnerait des images incolores.

En général on ne corrige l'aberration de réfrangibilité que par rapport à l'objectif, on laisse subsister celle qui provient de l'oculaire, parce que le petit intervalle que les rayons qui sortent de ce verre ont à parcourir pour arriver à l'œil, ne leur permet pas de subir une assez grande sépa-

ration pour que l'aberration de réfrangibilité qui en reste ne puisse être tolérée par l'œil.

517. Le calcul indique qu'il faut employer des prismes dont les angles soient en raison inverse des pouvoirs dispersifs. On satisfait d'abord à cette première condition d'une manière approximative, on achève ensuite par le tâtonnement.

Si l'on n'emploie que deux prismes et qu'on détruise les couleurs pour les deux rayons extrêmes, on remarque que les couleurs des rayons intermédiaires ne disparaissent pas complètement. Ce qui montre que la dispersion des différens rayons ne se fait pas suivant la même loi dans les substances dont la nature n'est pas la même. Mais, en général, l'achromatisme complet n'est pas nécessaire, il suffit d'éviter les franges les plus éclatantes, qui sont les franges jaunes et les franges rouges; de sorte que, quoique, d'après le calcul, il faille employer autant de prismes qu'il y a de couleurs différentes, on se borne à l'emploi de deux ou trois prismes.

Instrumens fondés sur la réflexion de la lumière.

518. Les goniomètres (mesure d'angles) sont fréquemment employés dans une infinité de recherches de physique et de cristallographie; les deux plus simples sont ceux de Malus et de Wollaston.

Goniomètre de Malus.

Le goniomètre de Malus (*fig.* 342) consiste en un cercle horizontal, gradué, sur lequel est placée une alidade mobile autour d'un axe vertical passant par le centre du cercle.

On fixe sur l'alidade, avec de la cire, le cristal dont on désire connaître l'angle dièdre. Supposons que cet angle soit celui des faces *A B* et *B C*. Il faut d'abord disposer le cristal de manière que l'arête commune *B B* soit verticale. On y parvient à l'aide d'une lunette *m n* fixée au pied même de l'appareil. On place l'instrument devant une fenêtre d'où l'on découvre des objets éloignés verticaux, tels que des cheminées, ou des paratonnerres. La verticalité de l'arête *B B*, commune aux deux faces, sera établie lorsque l'image réfléchie sur chacune de ces faces sera verticale, c'est-à-dire, lorsqu'elle viendra coïncider avec le fil tendu verticalement dans la lunette. Cette condition étant remplie, on fait tourner l'alidade qui porte le cristal, jusqu'à ce que l'image d'un objet, vue par réflexion sur une des faces de l'angle dièdre, coïncide avec l'entrecroisement des fils de la lunette. On fait de nouveau tourner l'alidade jusqu'à ce qu'on aperçoive l'image du même objet réfléchie sur l'autre face. L'angle dont l'alidade s'est déplacée, est précisément le supplément de l'angle dièdre des deux faces.

En effet, *C B A* (*fig.* 343) étant la projection de l'angle dièdre, la lunette ainsi que l'objet étant immobile, la face *B A'* est nécessairement parallèle à *B C* quand le cristal réfléchit l'objet dans la seconde épreuve. L'angle *A B A'* est donc supplément de *A B C*.

Ce procédé présente un avantage, c'est qu'on peut répéter les mesures, et diviser la valeur totale par le nombre des opérations. On atténue ainsi considérablement l'erreur.

Goniomètre de Wollaston.

519. Le goniomètre de Wollaston est destiné à la me-

sure des angles dièdres des petits cristaux. Cet instrument est formé d'un cercle vertical gradué (*fig.* 344), mobile autour d'un axe horizontal *a b*, dans lequel est placé un autre axe horizontal plus petit *c d*, l'extrémité saillante de ce petit axe, porte plusieurs pièces à mouvemens rectangulaires, sur lesquelles on fixe le cristal, en *h*, avec de la cire. Quand on veut prendre la mesure de l'angle d'un cristal, on se place devant un édifice qui présente plusieurs lignes horizontales et parallèles. On dispose l'instrument de manière que son limbe soit perpendiculaire aux lignes horizontales qui doivent servir de mire, ensuite on fait tourner le petit axe *c d* jusqu'à ce que l'œil, étant placé près du cristal, aperçoive par réflexion une des lignes supérieures et horizontales de l'édifice. On le tourne encore jusqu'à ce que cette image réfléchie coïncide avec une des lignes horizontales vue directement. Si la même condition est remplie sur l'autre face de l'angle dièdre, on peut être bien certain de l'horizontalité parfaite de l'intersection commune des deux faces. Si on répète la même opération en partant d'une position déterminée, et en faisant mouvoir le cristal à l'aide du grand axe *a b* auquel sont attachés et le limbe *k i* et le petit axe *c d*, il est clair que l'arc parcouru par le limbe sera supplément de l'arc qui mesure l'angle dièdre. On peut d'ailleurs écrire la division tracée sur le limbe de manière qu'elle donne l'angle même.

Chambre claire (camera lucida).

520. La chambre claire peut être employée pour le dessin. La partie principale de cet instrument est un prisme quadrangulaire *A B* (*fig.* 345). Ce prisme est disposé de telle manière qu'il présente la face *A B* perpendiculaire-

ment à la direction des rayons lumineux envoyés par les objets extérieurs. Les rayons, à leur entrée dans la face *A B*, n'éprouvent aucune déviation; ils subissent sur les faces intérieures *B L* et *L E* deux fois la réflexion totale, et arrivent à l'œil de l'observateur placé en *O*. Cet observateur verra ainsi une image des objets, droite et horizontale, qu'il croira voir venir directement à travers le prisme; et, s'il place son œil de manière que les rayons réfléchis n'occupent que la moitié de la pupille, il pourra voir à la fois l'image et le carton sur lequel elle paraîtra projetée, et en suivre toutes les parties avec un crayon à pointe fine. Si la vue réclame le secours des loupes convergentes ou divergentes, rien ne s'opposera à ce qu'on en fasse usage.

Telle est la *camera lucida* imaginée par Wollaston. La pratique a fait découvrir dans cet instrument ingénieux un défaut, qui consiste dans les apparitions et les disparitions de la pointe du crayon. Le plus petit mouvement de l'œil amène ces apparitions et ces disparitions alternatives qui fatiguent singulièrement la vue. Cependant, avec de l'exercice, plusieurs personnes sont parvenues à se servir avec succès de cette *camera lucida*.

521. M. J. B. Amici, de Modène, a proposé, il y a quelques années, une *camera lucida*, dont nous allons indiquer les principes. Ce nouvel instrument (*fig.* 346) consiste en un miroir de métal, dont la surface *A B* est inclinée de 135° sur la surface *DC* d'une lame de verre *DCEF*, à faces parallèles. Les rayons *S I* des objets sont réfléchis d'abord par le miroir, ensuite par la face antérieure du verre, de manière à devenir perpendiculaires à leur direction primitive. L'œil, situé en *O*, aperçoit l'objet éloigné en *Q*, à la surface d'une feuille, sur laquelle l'image du

papier peut être dessinée. Dans cette disposition, on n'a plus à craindre l'inconvénient signalé plus haut.

Voilà la construction simple de la nouvelle *camera lucida*. Ajoutons quelques détails pour en faciliter l'usage.

Une lentille concave, placée devant le miroir métallique, ou une lentille convexe, placée au-dessous de la lame de verre, donne aux rayons, venus des objets et de la pointe du crayon, la même divergence.

On peut, à l'aide de lentilles convenablement disposées, obtenir à volonté une image plus petite ou plus grande que l'objet.

A l'aide d'un verre coloré, placé devant le miroir *A B*, on diminue la vivacité de la lumière s'il est nécessaire.

Si le verre n'avait pas ses faces rigoureusement parallèles, l'image réfléchie par la seconde face *E F* ne coïnciderait pas avec celle que réfléchit la première face *C D*. Pour éviter le défaut de coïncidence, on dépolit une partie *H E* de la seconde face (1). Cette opération ne s'exécute que peu à peu, et après plusieurs essais de l'instrument.

Il est encore utile de disposer une lame opaque devant le miroir métallique, afin d'arrêter les rayons qu'il envoie directement à l'œil.

522. M. Amici a imaginé diverses autres dispositions. Par exemple, dans la figure 347, la lumière des objets traverse le verre, et se réfléchit sur le miroir métallique *A B* incliné sur ce verre de 45°.

Dans la figure 348, un prisme de verre *A B C* triangu-

---

(1) Cette coïncidence même n'a lieu dans le cas du parallélisme, que pour des objets éloignés.

laire et isocèle remplace le miroir métallique, et à la lame de verre *E F* est substitué un miroir métallique. Une fente, d'un diamètre moindre que celui de la pupille et pratiquée dans ce miroir, permet d'apercevoir le crayon.

Un prisme triangulaire et isocèle de verre étant préférable à un miroir métallique, tant à cause de son inaltérabilité, que parce qu'il réfléchit une plus grande proportion de lumière, M. Amici l'a substitué au miroir métallique dans sa première *camera lucida*.

Cette nouvelle *camera* se voit dans la figure 349. *A B C* est le prisme de verre isocèle, dont la base *A B* fait un angle de 45° avec le verre plan *D C*. Les rayons *S I* des objets se réfléchissent d'abord sur la face *A B* du prisme, ensuite sur la face *D C* du verre, et arrivent en *O*, dans l'œil. M. Amici observe que pour éviter que l'œil n'aperçoive en *R*, s'il s'avance un peu trop, une image produite par la réflexion intérieure des faces du prisme, il faut faire l'angle *E* un peu moindre qu'un angle droit, et couvrir la partie supérieure *C E* d'une lame de cuivre percée seulement d'une fente par laquelle on doit regarder. (*Voyez* le Mém. orig. *An. ch. et ph.*, t. 22.)

Ces détails sur les diverses espèces de chambres claires, sont propres à montrer le parti qu'on tire des prismes pour la réflexion de la lumière.

DOUBLE RÉFRACTION.

523. Lorsqu'un rayon de lumière tombe sur un milieu diaphane sous une incidence convenable, il y pénètre en éprouvant une déviation à laquelle on a donné le nom de réfraction. Le rayon réfracté et le rayon incident sont dans un même plan qui renferme la normale au point d'incidence; il existe un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction; c'est là la loi de la réfraction ordinaire (n° 444).

Les corps cristallisés dont la forme primitive n'est ni un cube, ni un octaèdre, jouissent de la propriété de partager le rayon réfracté en deux parties bien distinctes; l'une suit la loi précédente, c'est le *rayon ordinaire;* l'autre partie appelée le *rayon extraordinaire* suit une marche beaucoup plus compliquée. C'est en cela que consiste le phénomène de la double réfraction qui fera le sujet de ce chapitre.

La première observation relative à la double réfraction, paraît avoir été faite par Erasme Bartholin. L'explication de ce nouveau phénomène a exercé la sagacité des savans les plus distingués, à la tête desquels il faut placer Huyghens et Newton. Le génie d'Huyghens en avait découvert la véritable loi; mais elle fut rejetée sans examen parce qu'elle se trouvait liée au système des ondulations. Les travaux de Malus en France et de Wollaston en Angleterre, ont fixé de nouveau l'attention des physiciens

sur ce singulier phénomène, et ont montré que les constructions d'Huyghens en étaient la représentation fidèle. On verra par l'exposé suivant, les découvertes faites depuis Malus par les savans tant français qu'étrangers.

524. Dans les cristaux où les lois de la double réfraction sont les plus simples, il existe toujours une certaine direction autour de laquelle les choses se passent de la même manière de tous les côtés. Cette direction est *l'axe* du cristal; il ne faut pas la regarder comme une ligne unique; on peut concevoir dans un cristal autant d'axes qu'il y a de lignes parallèles à cette direction.

Il y a des cristaux où la similitude autour de l'axe n'a pas lieu, et où il en résulte la manifestation de deux directions particulières plus ou moins inclinées entre elles qui présentent des phénomènes semblables à ceux qu'on observe suivant l'axe; lorsque tout est pareil autour de lui : on les appelle cristaux à *deux axes;* les premiers sont appelés cristaux à un *axe.*

On s'occupera spécialemant dans ce qui va suivre des cristaux à un *seul axe.*

525. C'est dans le spath d'Islande que les phénomènes de la double réfraction ont été observés pour la première fois; c'est aussi l'une des substances qui les produisent avec le plus d'énergie (1).

On appelle *section principale*, le plan mené par l'axe et perpendiculairement à la face du cristal.

---

(1) Un fait bien singulier, c'est qu'un cristal de spath d'Islande, soumis à l'action de la chaleur, se dilate dans le sens de son axe, et se contracte perpendiculairement à cet axe (M. Mitscherlich). Il est probable que d'autres cristaux présentent un phénomène analogue.

L'axe de réfraction est la ligne qui joint les deux angles trièdes obtus. Cette ligne est également inclinée sur les faces du cristal.

Pour des rayons incidens perpendiculaires à la face du cristal, la déviation du rayon extraordinaire se fait toujours suivant le plan de la section principale, et cette déviation devient *nulle* toutes les fois que les rayons traversent le cristal parallèlement ou perpendiculairement à l'axe, comme on le verra plus loin.

526. Si l'on place un rhomboïde de spath d'Islande sur une ligne noire, et qu'on le fasse tourner, il y aura une position dans laquelle on n'apercevra qu'une seule image, ce sera celle où l'œil et la ligne seront dans le plan de la section principale.

Si l'on continue à tourner le cristal, la ligne se divise en deux parties, dont l'une qui est l'image ordinaire reste immobile, tandis que l'autre qui est l'image extraordinaire, se meut avec le cristal.

Si l'on substitue un point à la ligne, on voit *deux images* dans toutes les positions; seulement dans celle où la ligne paraît unique, les deux images du point et l'œil sont dans le même plan (section principale).

527. Si un rayon incident *S I* (*fig.* 356) dans le plan de la section principale, est incliné ou perpendiculaire à la surface, il se divisera en deux rayons *I O* et *I E* qui seront encore contenus dans le plan de la section principale, et qui, parvenus à la face inférieure du rhomboïde, sortiront en *E H* et en *O K* parallèlement au rayon incident.

Si le rayon incident *S I* (*fig.* 351), se trouve dans un plan différent de celui de la section principale, le rayon

extraordinaire s'écartera du plan d'incidence; mais les deux rayons émergens n'en seront pas moins parallèles au rayon incident.

528. Malus a mesuré l'amplitude $E O$ par un moyen fort simple qu'ont adopté tous les physiciens. Ce moyen consiste à tracer sur une plaque d'ivoire, un triangle rectangle $A B C$ dont le petit côté $A B$ a avec les autres côtés le rapport indiqué par la figure 352, les deux côtés $B C$ et $A C$ sont divisés en parties égales. On regarde le triangle à travers le rhomboïde et on le voit double, et pour chaque position le côté $A C$ de l'image ordinaire est coupé en un certain point I' par le côté $B' C'$ de l'image extraordinaire. Au moyen des divisions tracées sur les côtés $A C$ et $B C$, on connaît la disposition du point I', et prenant sur $B C$, une quantité $I C = I' C'$, on a deux points I et I' tels que l'image extraordinaire du premier se confond avec l'image ordinaire du second; il suffit de marquer sur la surface supérieure du rhomboïde, la position du point où se produit l'image simultanée des deux points I et I' et de prendre l'épaisseur du cristal, pour calculer l'angle compris entre les rayons ordinaire et extraordinaire.

529. Les deux premières expériences nous ont appris que le rayon extraordinaire est rejeté vers l'angle A, de sorte que les choses se passent comme s'il résidait dans l'axe du cristal une force répulsive, dont l'action s'exerce sur une partie du rayon incident, qui forme le rayon extraordinaire. Soumettons cette idée à l'épreuve de l'expérience.

Coupons un rhomboïde de spath d'Islande par deux

plans perpendiculaires à l'axe *A B*, et retranchons les deux pyramides triangulaires (*fig.* 353).

Un rayon incident *S I*, perpendiculaire à l'une ou l'autre des deux faces artificielles du cristal, n'est pas divisé. En effet, dans ce cas, la force répulsive doit être nulle sur un rayon parallèle à l'axe.

Si le rayon incident *S I* est incliné à la face artificielle, la réfraction est double, et l'angle compris entre le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire, est constant pour une même inclinaison, quel que soit le plan d'incidence; ce qui n'a lieu que pour les faces perpendiculaires à l'axe. Ce résultat montre que la force répulsive agit à partir de l'axe, de tous côtés avec la même énergie.

Soit encore un cristal taillé en forme de parallélipipède (*fig.* 354), de telle manière que l'arête *A A'* soit parallèle à l'axe du cristal; quatre faces seront parallèles à cet axe, et deux lui seront perpendiculaires. Un rayon *S I* tombant (*fig.* 355) obliquement sur des faces parallèles à l'axe et dans un plan perpendiculaire à ce même axe, donne deux rayons qui restent dans le plan d'incidence; la déviation du rayon extraordinaire est moindre que celle du rayon ordinaire, et ce cas est celui où les deux rayons s'écartent le plus l'un de l'autre (1).

---

(1) On a reconnu, par l'observation, que les rayons qui parcourent un cristal parallèlement à l'axe, ont la même vitesse, et que les vitesses de propagation présentent la plus grande différence quand les rayons sont perpendiculaires à l'axe. La vitesse de propagation des rayons ordinaires est la même dans toutes les directions. La vitesse de propagation des rayons extraordinaires varie au contraire avec l'angle qu'ils font avec

Si dans le même plan perpendiculaire à l'axe, on fait varier l'angle d'incidence, on trouve qu'il existe, pour le rayon extraordinaire comme pour le rayon ordinaire, un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction (1).

---

l'axe. Les expériences d'Huygens, de Wollaston et de Malus sur le spath d'Islande, et celles de M. Biot sur le cristal de roche, démontrent que la différence entre les carrés des vitesses de propagation des rayons ordinaires et extraordinaires, est proportionnelle au carré du sinus de l'angle, que la direction de ceux-ci fait avec l'axe (dans l'hypothèse de l'émission), ou à l'unité divisée par le même carré (dans l'hypothèse des ondulations). Dans la direction de l'axe, le sinus est nul, la différence des vitesses est nulle aussi, et les rayons ordinaires et extraordinaires auront la même vitesse. Cette différence croîtra avec le sinus, jusqu'à ce que les rayons soient perpendiculaires à l'axe, où elle atteindra son maximum.

La différence des vitesses est positive dans certains cristaux (carbonate de chaux), et négative dans d'autres (cristal de roche). Dans les premiers, les rayons ordinaires sont animés de moins de vitesse ; et dans les seconds, de plus de vitesse que les rayons extraordinaires.

(1) *Constructions d'Huygens.*

1°. *Rayon incident dans un plan perpendiculaire à l'axe.*

Soient b et b' les rapports des sinus des angles d'incidence et de réfraction pour les rayons ordinaire et extraordinaire, et soit posé $\frac{1}{b} = b$, et $\frac{1}{b'} = a$; on décrit du point d'incidence I (*fig.* 356) comme centre, un cercle ABC avec b pour rayon. Soient SI le rayon incident, ID une ligne menée perpendiculairement à ce rayon, FD une droite égale à l'unité insérée dans l'angle FID, et perpendiculaire à ID; si du point F où elle coupe le cristal, on mène la tangente FO, au cercle ABC, le point O correspondra au rayon ordinaire IO. En effet, les angles SIP et FID étant égaux, ainsi que les angles NIO et OFI, comme ayant leurs

530. Les constructions précédentes ne sont pas applicables dans tous les cas, puisqu'elles supposent les deux rayons dans un même plan.

Voici la construction générale. On mène par le point d'incidence une droite AIB parallèle à l'axe du cristal (*fig.* 359); sur cette droite, comme axe, on décrit un ellipsoïde dont le demi-axe des pôles AI est égal à b rapport constant pour la réfraction ordinaire, et dont le demi-axe de l'équateur est égal à a rapport constant de la réfraction extraordinaire. Cet ellipsoïde est aplati puisque a est plus grand que b.

---

côtés perpendiculaires, on a $\sin SIP = \sin FID = \frac{DF}{FI} = \frac{1}{FI}$, et $\sin NIO = \sin OFI = \frac{IO}{FI} = \frac{b}{FI}$. De ces deux égalités on tire $\sin SIP : \sin NIO :: \frac{1}{FI} : \frac{b}{FI}$, ou $\sin i : \sin r :: 1 : b$, ou $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{b} = \ell$. IO est donc bien la direction ordinaire.

La construction qui donne la direction IE du rayon extraordinaire, est tout-à-fait semblable; il suffit de mener du point F une tangente au cercle HKR, décrit avec un rayon égal à $\frac{1}{\ell'} = a$.

2°. *Rayon incident dans un plan parallèle à l'axe* (*fig.* 357.)

Le rayon ordinaire suit toujours le rapport constant des sinus, de sorte qu'on a encore $\frac{\sin i}{\sin r} = \ell = \frac{1}{b}$; mais cette constance ne s'observe plus pour le rayon extraordinaire, car on trouve pour ce dernier,

$$\tang r' = \frac{b}{a} \tang r.$$

r' et r étant les angles de réfraction pour les rayons extraordinaire et ordinaire, et r' étant plus petit que r.

La direction du rayon extraordinaire peut encore se déterminer par une construction géométrique. D'abord la direction du rayon ordinaire

Par le rayon incident on mène un plan perpendiculaire à la face du cristal; on détermine le point F sur la trace de ce plan, comme on l'a fait dans les deux constructions des figures 356 et 358. On tire dans le plan de la face du cristal, qui est celui de l'ellipse $H\,M$, une droite $T\,F\,T'$ perpendiculaire à la trace $F\,I\,F'$; par la droite $T\,E\,T'$, on mène un plan tangent à l'ellipsoïde, et le point de tangence E donne la direction $I\,E$ du rayon extraordinaire.

Si au lieu d'un ellipsoïde on décrit une sphère sur le diamètre $A\,I\,B$, le point O, déterminé par le plan tangent mené à cette sphère par la même ligne $T\,F\,T'$, appartiendra au rayon ordinaire $I\,O$. (*Voyez* Malus, double réfract., p. 4, etc.)

531. Nous avons dit, n° 522, que les constructions dont il vient d'être question, sont d'accord avec l'expérience.

---

est déterminée comme dans le cas précédent. Pour trouver celle du rayon extraordinaire, on trace du point I une ellipse $A\,N\,K$ (*fig.* 358), dont le demi-petit axe $I\,A = b$, et le demi-grand axe $I\,N = a$; puis du point F on mène une tangente FE, et $I\,E$ est le rayon extraordinaire. En effet, tang r $=$ tang $O\,I\,N =$ tang $I\,O\,Q = \frac{I\,Q}{Q\,O}$, tang $r' =$ tang $EIN =$ tang $IEQ = \frac{I\,Q}{Q\,E}$, d'où tang r : tang r' :: $Q\,E : Q\,O$; mais, d'après une propriété connue de l'ellipse $Q\,E : Q\,O :: I\,N : I\,A :: a : b$: donc

$$\text{tang } r' = \frac{b}{a} \text{ tang } r.$$

Donc $I\,E$ est la direction du rayon extraordinaire.

Huygens a été conduit à ces constructions par la manière dont il se représentait les phénomènes de la double réfraction. Selon ce grand géomètre, la réfraction ordinaire serait produite par les ondes sphériques, et la réfraction extraordinaire par des ondes elliptiques, excitées dans l'éther qui remplit le cristal.

Elles supposent la connaissance de a et de b. Ces lettres remplacent $\frac{1}{l}$ et $\frac{1}{l'}$; il s'agit donc de déterminer l et l'. On y parvient en taillant la substance donnée en un prisme dont les arêtes AB, CD et HI soient parallèles à l'axe (*fig.* 360). Nous savons que dans un plan perpendiculaire à ces arêtes, le rapport de réfraction est constant pour l'un et l'autre faisceaux. On déterminera les rapports l et l' par la méthode indiquée n° 445, ou par une autre. D'après Malus $l = 1,654$ et $l' = 1,483$ pour les rayons moyens du spectre et pour le spath d'Islande.

532. Pendant long-temps on a cru que la popriété de doubler les images, appartenait seulement au spath d'Islande; mais les recherches modernes ont appris qu'elle est le partage d'un grand nombre de substances.

On doit à M. Biot une distinction importante entre les différens cristaux : les uns, comme le spath d'Islande, le phosphate de chaux, le beril, la tourmaline, etc., ont un axe répulsif; les autres, comme le cristal de roche, le sulfate de barite, la topaze, le sulfate de chaux, etc., ont un axe attractif.

533. M. Biot avait annoncé depuis long-temps l'existence de deux axes dans le mica. M. Wollaston et M. Brewster ont déterminé les premiers, avec exactitude, la direction et les propriétés de ces axes dans un grand nombre de cristaux, en les coupant perpendiculairement à ces axes (topaze, sulfate de chaux). Ces deux axes sont en général inclinés également sur les faces correspondantes de cristallisation, et l'angle qu'ils font entre eux, varie dans la plupart des cristaux pour les rayons de diver-

ses couleurs. Personne jusqu'ici n'a vu des cristaux à trois axes (1).

534. M. Fresnel a reconnu que dans les cristaux à deux axes, il n'y a pas de rayon ordinaire proprement dit, ou, en d'autres termes, qu'aucune portion de la lumière qui les traverse ne s'y réfracte constamment suivant la loi de Descartes.

Ce résultat remarquable peut être constaté de deux manières : 1° des prismes d'un même angle, taillés dans une topaze sous divers sens, ne réfractent pas également les rayons ordinaires ; 2° deux lames parallèles et égales en épaisseur, prises dans le même cristal de topaze, mais dans des sens différens, placées de manière à recevoir des rayons qui donnent des franges par leur interférence, déplacent ces franges inégalement. (*Voyez* plus loin la *diffraction.*) Si les pouvoirs réfractifs des deux lames étaient égaux, les franges ne seraient pas inégalement déplacées. (*An. ch. et phy.*, t. 20, p. 338.)

535. Voici la construction par laquelle M. Fresnel a représenté la loi générale de la double réfraction des cristaux à deux axes.

Deux rayons, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire, se meuvent dans un cristal suivant une direction unique, et l'on veut connaître leurs vitesses.

Pour cela, il faut, dit M. Fresnel, considérer un point

---

(1) On avait regardé comme une règle générale, que les lignes qui divisent en deux parties égales l'angle compris entre les axes optiques, devaient être également inclinées sur les faces correspondantes du cristal. M. Mitscherlich a reconnu que dans quelques sels, et en particulier dans le sulfate de magnésie, elles s'inclinent plus d'un côté que de l'autre.

quelconque de cette direction comme le centre d'un ellipsoïde à trois axes inégaux, et mener ensuite par ce centre un plan perpendiculaire à la direction commune des deux rayons; les moitiés du grand et du petit axes de la section elliptique, faites par le plan, dans la surface, représentent les deux vitesses de propagation, si l'on adopte le système des ondes et l'unité divisée par les mêmes vitesses dans le système de l'émission. Quant aux plans de polarisation des deux faisceaux, ils sont respectivement perpendiculaires aux demi-axes de l'ellipse qui représentent les vitesses. (Voyez le *Mém.* de M. Fresnel.)

536. La lumière, par sa réflexion à la première surface des cristaux doués de la double réfraction, ne paraît pas éprouver de modification particulière; la loi est la même que pour toutes les substances. Mais, pour la lumière qui a traversé un cristal de ce genre et qui éprouve à la seconde surface une réflexion partielle, il n'en est pas ainsi; chaque rayon subit généralement une nouvelle bifurcation, et il en résulte ainsi quatre rayons.

537. M. Brewster avait reconnu qu'on pouvait donner au verre, en le comprimant, la propriété de colorer la lumière polarisée. Il avait même été conduit à avancer que la compression ou la dilatation du verre, lui donnait la structure des cristaux doublement réfringens.

M. Fresnel a mis cette double réfraction en évidence, en divisant la lumière en deux faisceaux distincts par une combinaison de prismes de verre comprimés... Il s'est assuré dans la même expérience, que les deux faisceaux sont polarisés, l'un parallèlement et l'autre perpendiculairement à la direction de la compression, ce qui ne per-

met pas d'attribuer dans ce cas la bifurcation de la lumière à des réfractions multipliées, occasionées par des stries du verre. On voit que le verre comprimé se conduit ici comme un cristal dont l'axe coïnciderait avec la direction de la compression, ainsi que l'avait supposé M. Brewster, d'après l'analogie des phénomènes de la polarisation.

La figure 361 [illegible] position des verres dans l'expérience de M [illegible] savant physicien observe que la double réfr[illegible] erre, comprimé même au point d'éclater, étai[illegible] e, un seul prisme n'aurait donné qu'une diverge[illegible] ensible. C'est pourquoi il a employé quatre prism[illegible] ués *A* dans la figure. Les prismes sont comprimés [illegible] aide d'un étau dans un sens perpendiculaire à leurs arêtes. Pour achromatiser les prismes et supprimer dans la marche de la lumière les déviations inutiles à l'expérience, M. Fresnel a placé entre eux trois autres prismes renversés *B*. Les angles réfringens *a* et *b* sont de 90°. Aux extrémités de l'appareil sont deux prismes *C* de 45°, destinés à composer avec les prismes précédens un parallélipipède. Les différens prismes sont collés les uns aux autres avec de l'essence de térébenthine, dont le pouvoir réfringent est peu différent de celui du cristal de Saint-Gobain qui forme les prismes. Les prismes *A* dépassent un peu les autres prismes, afin que ceux-ci ne participent pas à la compression des premiers. Un faisceau de lumière, entrant perpendiculairement à la face de l'un des prismes extrêmes, donne deux images qui ne sont écartées, à un mètre de distance, que d'un millimètre et demi, preuve de la faiblesse de la double réfraction du verre comprimé. (*An. ch. et phys.*, t. 20, p. 376.)

Applications de la double réfraction.

538. Les deux applications les plus importantes qu'on ait faites de la double réfraction sont, 1° le micromètre de Rochon; 2° l'emploi de ce micromètre pour la mesure du grossissement dans les instrumens d'optique.

Micromètre.

539. Rochon a imaginé cet instrument pour mesurer les diamètres apparens des corps célestes, etc.

La partie de cet instrument, sur laquelle il faut d'abord fixer son attention, est un double prisme rectangulaire *A A' C C'* (*fig.* 362), formé par la réunion de deux prismes triangulaires *A A' C* et *A' C C'*. L'axe du cristal du premier est parallèle à *A A'*; celui du second est l'intersection des deux faces *A' C* et *A' C'*. Ils sont réunis par une couche mince de térébenthine.

Si un faisceau *S I* tombe sur ce double prisme, perpendiculairement à la face *A C*, il n'éprouvera pas de déviation dans la partie *A A' C*. Le faisceau ordinaire suivra encore dans le second prisme son chemin en ligne droite, puisqu'il ne change pas de milieu; car la couche d'essence n'exerce aucune influence sur la direction du faisceau. Le second cristal repousse le faisceau extraordinaire dans la direction *I' E*.

Soit maintenant placé un semblable prisme dans une lunette astronomique, dont *A B* (*fig.* 363) est l'objectif; soit un objet quelconque très-éloigné, l'image renversée de cet objet sera produite au foyer en *F H*; supposons le double prisme tellement placé que les deux images

soient tangentes l'une à l'autre, comme l'indique la figure.

Si le double prisme était plus rapproché de l'objectif, les deux images $H F$ et $H' F'$ (*fig.* 364) seraient séparées. Enfin, si le double prisme était éloigné de manière à placer les points a et a' au foyer, l'on n'apercevrait plus qu'une seule image.

Si F représente la distance focale $O F$, V l'angle sous lequel on aperçoit l'objet, on aura $\text{tang } V = \frac{H F}{F}$; mais, en appelant α l'angle constant $H \alpha F$, et D la distance $H \alpha$, on a également $\frac{H F}{D} = \text{tang } \alpha$. Égalant la valeur de $H F$, tirée de chaque équation, on a

$$\text{tang } V = \frac{\text{tang } \alpha}{F} D \ (a).$$

$\frac{\text{tang } \alpha}{F}$ est une quantité constante pour une même lunette, qu'il faut déterminer. Cette détermination sert dans toutes les observations. On l'obtient de la manière suivante. Soit un objet (*fig.* 365) d'un rayon R, et placé à la distance L, l'angle sous lequel on l'aperçoit V; on aura $\sin \frac{1}{2} V = \frac{R}{L}$.

Pour avoir D, on place le double prisme d'abord au foyer, et ensuite dans une position propre à mettre les deux images en contact. Une division tracée sur le tuyau de la lunette, donne le chemin parcouru par le prisme. Une fente longitudinale permet le déplacement (*fig.* 366).

Les deux quantités V et D doivent satisfaire à la relation ci-dessus : c'est-à-dire qu'on doit avoir

tang. $V = \frac{\text{tang}\, a}{F} D$, d'où $\frac{\text{tang}\, V}{D} = \frac{\text{tang}\, a}{F}$; et V et D sont connus en nombres, $\frac{\text{tang}\, a}{F}$ sera également connu.

Il ne restera donc dans chaque observation à trouver que la quantité D pour avoir la grandeur apparente d'un astre ou d'un objet quelconque éloigné, puisque tout est connu dans l'équation (a), à l'exception de V qui s'en déduira.

Au-delà du prisme se trouve l'oculaire comme dans la lunette astronomique ordinaire. Nous n'en avons pas parlé dans ce qui précède, parce qu'il ne sert qu'à agrandir les images, et sa présence ne modifie nullement nos raisonnemens.

La lunette de Rochon peut être d'une grande utilité pour apprécier la distance des objets dont on connaît la grandeur ; on cherche d'abord la grandeur apparente à l'aide de la lunette, et si $2R$ est la grandeur réelle, on aura la distance L par l'équation, $\sin \frac{1}{2} V = \frac{R}{L}$. On peut connaître ainsi la distance d'un corps d'armée, d'une ville assiégée, etc.

540. Ce que nous venons de dire suppose qu'on ait déterminé préalablement l'angle de déviation du double du prisme de cristal de roche; mais il est facile de se dispenser de cette détermination, par quelques observations. Supposons qu'on ait à sa disposition une lunette astronomique munie d'un double prisme, et qu'on veuille, sans connaître l'angle de déviation, employer cette lunette pour mesurer des petits diamètres : on prendra une mire d'une grandeur connue, on amènera le double prisme au

foyer, afin d'avoir une simple image. Ce point sera le zéro de l'échelle tracée sur le tuyau de la lunette. On fera mouvoir le double prisme jusqu'à ce que deux images soient amenées en contact. Supposons par exemple que l'objet soit vu sous un angle de 60″, et que le prisme soit éloigné du point zéro de 60 parties de l'échelle. Chaque partie vaudra une seconde. On pourra vérifier les parties de l'échelle avec des disques différens. Maintenant qu'on dirige la lunette sur un objet d'un diamètre inconnu. Supposons que pour le contact des images, le prisme soit à la trentième partie de l'échelle, le diamètre apparent de l'objet sera de 30″.

L'emploi du micromètre tel que Rochon l'a construit, a plusieurs inconvéniens ; le premier consiste en ce que le double prisme, dans son mouvement, peut s'incliner à l'axe de la lunette, le second est la production des couleurs. C'est ce dernier défaut qui a empêché Rochon de faire servir son instrument à la détermination du diamètre du soleil et du diamètre de la lune : car le défaut d'achromatisme est d'autant plus sensible, que le double prisme est plus loin du foyer.

541. Le micromètre proposé par M. Arago est exempt des deux défauts que nous venons de signaler dans le micromètre de Rochon. M. Arago place le double prisme de cristal de roche hors de la lunette et contre l'oculaire.

Si l'on regarde un disque *d* (*fig.* 367) avec une lunette ordinaire, on aura au foyer une seule image *i*; si l'on regarde cette image avec un prisme *p*, on aura au foyer deux images *i* et *i'* séparées l'une de l'autre par un intervalle égal à l'angle constant *i p i'* du prisme. Concevons maintenant un oculaire placé entre le double prisme et la double

image, elle sera plus ou moins amplifiée; et si cet oculaire est composé de deux loupes mobiles, on pourra faire marcher l'une d'elles jusqu'à ce que le grossissement soit tel que les deux images paraissent en contact. Désignons par A l'angle de bifurcation du prisme, par D le diamètre apparent de l'objet, et par G le grossissement de l'oculaire, il est évident qu'on aura $A = G \times D$; de cette relation on tirera $D = \frac{A}{G}$, et ainsi lorsqu'on aura mesuré l'angle de bifurcation A du prisme, et qu'on connaîtra le grossissement G, on pourra toujours déterminer le diamètre apparent D de l'objet. Quant aux différens grossissemens de l'oculaire on les obtiendra en observant des disques d'un diamètre connu, et on les marquera sur le tuyau de l'oculaire.

Mesure du grossissement dans les instrumens d'optique.

542. Rappelons-nous d'abord que le grossissement dans les instrumens destinés à voir les objets éloignés, est égal au rapport des angles sous lesquels le même objet est vu à l'œil nu et à travers la lunette.

M. Arago mesure ce grossissement au moyen d'un double prisme semblable à celui dont nous venons de parler. Il place contre l'oculaire de la lunette, dont il veut connaître le grossissement, un prisme dont l'angle de bifurcation est A. Il regarde alors un disque que l'on peut éloigner ou approcher convenablement, pour que les deux images que l'on voit au foyer soient en contact. Connaissant la grandeur du disque et la distance à laquelle il se trouve de la lunette, on aura le diamètre D sous lequel

il est vu. Soit donc G le grossissement de la lunette, on aura d'après ce que nous venons de dire, pour le micromètre oculaire $A = G\,D$, d'où l'on tire $G = \frac{A}{D}$.

Pour avoir l'angle A de bifurcation du double prisme, M. Arago regarde, à travers le prisme seul, à la vue simple, une mire d'un diamètre connu, placée à une distance connue, et à cet effet il s'éloigne ou s'approche jusqu'à ce que les deux images soient en contact. Il a ainsi A, puisque $\tang A = \frac{D}{L}$, D est le diamètre et L la distance de l'objet.

De la polarisation de la lumière.

543. L'objet de cet article est de faire connaître les propriétés que la lumière acquiert, soit par sa transmission à travers les lames douées ou non douées de la double réfraction, soit par sa réflexion sous certaines incidences sur les surfaces polies.

544. La lumière, en traversant un rhomboïde de spath d'Islande, et en général un cristal doué de la double réfraction, subit un changement dans sa nature; en effet, 1° si les deux faisceaux provenant d'un premier cristal, tombent perpendiculairement sur un second cristal, dont toutes les faces sont parallèles à celles du premier, on n'observe pas de nouvelle division. Le faisceau qui provient de la réfraction ordinaire du premier cristal, se réfracte ordinairement dans le second cristal, de même le faisceau extraordinaire dans le premier cristal, reste extraordinaire dans le second cristal.

2°. Lorsque les sections principales sont à angle droit,

le faisceau qui provient de la réfraction ordinaire du premier cristal, est réfracté extraordinairement par le second cristal, et réciproquement. Dans ce cas comme dans le précédent, il n'y a que deux images. Mais dans toutes les positions intermédiaires aux deux précédentes, chaque faisceau se divise en deux autres dans le second cristal.

3°. Les deux faisceaux produits par la transmission du faisceau ordinaire à travers le second rhomboïde, ne sont d'égale intensité qu'autant que la section principale du premier fait un angle de 45° avec celle du second; pour toutes les autres positions, les deux faisceaux ou les deux images qu'ils donnent, ont des intensités inégales, et même une d'elles s'évanouit entièrement lorsque la section principale du second rhomboïde est parallèle à celle du premier; c'est l'image extraordinaire, et l'image ordinaire parvient à son maximum d'éclat, quand les deux sections principales sont à angle droit, l'image ordinaire disparaît, et l'image extraordinaire acquiert le maximum d'éclat. C'est l'inverse pour le faisceau extraordinaire.

545. Si l'on reçoit dans un rhomboïde de spath d'Islande, et perpendiculairement à sa surface, un faisceau réfléchi par une glace polie et non étamée, sous l'angle de 35° 25′, compté de la surface, on remarquera qu'il y a deux positions dans lesquelles ce faisceau n'éprouve aucune division par son passage dans le cristal; ce sont celles où la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion. Le faisceau transmis dans le cas du parallélisme, jouit des propriétés du faisceau que nous avons appelé ordinaire, le rayon transmis dans le cas de la perpendicularité, a toutes les propriétés du faisceau extraordinaire.

Si l'on fait tourner le cristal, on remarque que les deux

images fournies par le faisceau, sont d'égale intensité quand le plan de réflexion fait un angle de 45° avec la section principale du cristal, et que pour les autres positions les intensités sont inégales, et que l'inégalité est d'autant plus grande que le plan de réflexion s'écarte plus de 45°. Il résulte de ces expériences que la lumière réfléchie sous l'angle de 35°, 25′ sur une glace polie, se comporte précisément comme le faisceau ordinaire sorti d'un cristal dont la section principale aurait été dirigée dans le plan de réflexion.

546. Si l'on reçoit sur une seconde glace *C D* (*fig.* 368) un faisceau déjà réfléchi par une première glace *AB*, sous l'angle de 35°25′, et qu'on dispose la seconde glace, de manière que l'incidence s'y fasse sous le même angle que sur la première face; voici ce qu'on remarque en faisant tourner la glace *C D* de manière qu'elle reçoive toujours le faisceau lumineux sous un angle de 35°, 25′; quand le plan de réflexion sur la deuxième glace coïncide avec le plan de réflexion sur la première, l'intensité de la lumière réfléchie par la seconde glace est à son maximum. Quand le deuxième plan est dirigé perpendiculairement au premier, il n'y a plus du tout de lumière réfléchie. Il y a donc deux positions où la lumière réfléchie est à son maximum et deux autres où elle disparaît en totalité.

547. Ces expériences montrent que la lumière modifiée par la réflexion sous une incidence particulière, ou par son passage à travers un rhomboïde de spath d'Islande, manifeste des propriétés très-différentes selon qu'on présente une surface réfléchissante, à tel ou tel côté de ses rayons. C'est ce qui a fait donner à ces phénomènes le nom de *polarisation*, ainsi un rayon polarisé présente le long de cha-

cune de ses faces, des propriétés particulières; tandis que toutes les faces d'un rayon ordinaire, jouissent de propriétés exactement pareilles. On est conduit par là, à supposer qu'un rayon de lumière ordinaire se compose, dans une étendue finie, d'une infinité de portions infiniment petites, dont chacune est polarisé dans un sens particulier, de manière à ce que de quelque côté qu'on considère ce rayon, il présente dans une longueur finie, un nombre égal de portions infiniment petites, semblablement polarisées.

Les phénomènes de la polarisation par réflexion, ont été observés pour la première fois par Malus.

548. On est convenu de dire du faisceau réfléchi par le verre sous 35°,25′ qu'il est polarisé dans le plan de réflexion; de même du faisceau ordinaire sorti d'un rhomboïde de spath d'Islande qu'il est polarisé dans le plan de la section principale.

Conséquemment on doit dire du faisceau extraordinaire, qu'il est polarisé perpendiculairement à la section principale, puisque nous avons vu qu'il présente dans ce sens les mêmes propriétés que le faisceau ordinaire dans le plan de la section principale.

549. Un des résultats des observations de Malus, est que, lorsqu'un faisceau se polarise complétement à la première surface d'une lame à faces parallèles, le faisceau réfracté tombe sur la seconde surface sous un angle propre à la polarisation complète, ce qui montre que les sinus de l'angle de polarisation sur la seconde surface est à l'angle de polarisation sur la première dans le rapport *des sinus des angles de réfraction et d'incidence.* (*Malus*, p. 225.)

Si l'on fait arriver sur une lame à faces parallèles

un faisceau qui échappe à la réflexion sur la première face, il y échappera aussi sur la seconde; il se conduirait de même à l'égard d'une seconde et d'une troisième lames. Si l'on faisait faire à tout le système un quart de révolution, la lumière au lieu d'être transmise en totalité, serait réfléchie; on tire de là cette conséquence remarquable, que par une seule différence de position la même pile de glaces diaphanes peut devenir alternativement opaque ou transparente.

550. La portion de lumière transmise dans l'expérience du n° 545 possède des propriétés analogues à celles dont est douée la lumière réfléchie. Seulement on trouve qu'elle n'est jamais complétement polarisée (1), puisqu'elle donne toujours deux images par son passage à travers un rhomboïde de spath d'Islande. De plus, on reconnaît que reçue sur une deuxième lame diaphane, elle ne disparaît que partiellement, tandis que la lumière polarisée par réflexion, traverse complétement une seconde lame qui lui est présentée dans une certaine position (n° 546). Enfin, elle donne deux images maximum dans le cas de la perpendicularité des deux plans de réflexion, et minimum dans le cas des parallélismes. C'est précisément *le contraire de la lumière réfléchie.*

M. Arago a reconnu, par des expériences ingénieuses, que la quantité de lumière polarisée par réflexion, sur la surface d'un corps diaphane, est égale à celle qui se polarise par réfraction. L'énoncé de ce principe fort remarquable peut être généralisé ainsi, toutes les fois que la lumière se divise en deux faisceaux (sans qu'il y ait absorp-

(1) A moins qu'on ne lui fasse traverser plusieurs plaques parallèles.

tion), la même quantité de lumière polarisée dans l'un, se trouve dans l'autre polarisée suivant une direction perpendiculaire.

551. La polarisation de la lumière peut être produite par toutes les substances diaphanes; l'angle seulement est variable. Par exemple, cet angle est de 35° pour le verre, de 37° pour l'eau. M. Brewster a découvert à cet égard une loi fort simple; c'est que l'angle sous lequel la polarisation complète se produit, a pour tangente le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction. Ainsi $\text{tang } i = \frac{\sin i}{\sin r} = l$. Mais $\text{tang } i = \frac{\sin i}{\cos i}$, donc $\cos i = \sin r$, $= \sin i' = \cos r'$, donc pour l'angle de polarisation le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont *perpendiculaires l'un à l'autre* (*fig.* 369). Est-ce une loi rigoureuse ou n'est-ce qu'une loi approximative? c'est ce qui n'est pas encore décidé.

Sous les autres incidens, la polarisation n'est que partielle; c'est-à-dire que la lumière réfléchie donne dans toutes les positions deux images à travers un rhomboïde de spath d'Islande. Cependant il faut dire que les maximum d'intensité de ces images répondent toujours aux mêmes directions de la section principale. Enfin, lorsque les faisceaux sont perpendiculaires, ou presque parallèles à la surface, la lumière réfléchie ne présente plus aucune trace de polarisation, ou en d'autres termes la lumière réfléchie donne par sa transmission à travers un rhomboïde, deux images d'égale intensité dans toutes les positions.

552. Plusieurs corps opaques qui ne jouissent pas d'une puissance réfractive très-grande, tels que le marbre, les vernis noirs, peuvent aussi imprimer une polarisation

complète aux rayons qu'ils réfléchissent régulièrement sur leur surface; tandis que d'autres corps parfaitement diaphanes, ou demi-transparens, mais très-réfringens, tels que le diamant ou le verre d'antimoine, ne la polarisent jamais complétement; mais ce sont surtout les substances métalliques qui polarisent le moins bien la lumière qu'ils réfléchissent, même sous les incidences les plus favorables.

553. Des expériences, MM. Arago et Fresnel ont appris que des rayons polarisés, n'exercent plus d'influence les uns sur les autres quand leurs plans de polarisation sont perpendiculaires entre eux, c'est-à-dire qu'ils ne forment plus de franges quoique toutes les conditions nécessaires à leur apparition, dans le cas ordinaire, soient scrupuleusement remplies. (*Voyez* plus loin le principe des interférences.) Si dans ces expériences on s'arrange de manière à écarter les plans de polarisation de la perpendicularité, on parvient toujours à faire paraître les franges.

554. On sait que quand un faisceau de lumière polarisée passe au travers d'un rhomboïde de spath d'Islande, dont la section principale est parallèle au plan de polarisation, l'image extraordinaire s'évanouit (n° 545); M. Arago a vu que l'image reparaît quand on place devant le rhomboïde une plaque cristallisée douée de la double réfraction, et dont la section principale n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation; son intensité devient même égale à celle de l'image ordinaire, quand cette section principale est inclinée de 45° au plan primitif; dans ce cas comme dans les autres, les deux images sont blanches, si la plaque interposée est assez épaisse, si elle a, par exemple, au moins un millimètre pour le cristal de roche ou le sulfate de chaux; mais si elle est plus mince, les deux images se colorent de teintes complémentaires

qui changent de nature avec l'épaisseur de la lame, et varient seulement d'intensité quand on la fait tourner dans son plan, en la laissant toujours perpendiculaire aux rayons incidens.

Cette belle découverte a occupé un grand nombre de physiciens. MM. Biot, Young et Brewster ont le plus contribué à faire connaître les lois de ces phénomènes.

M. Biot a remarqué que les couleurs des lames cristallisées suivent, dans leurs épaisseurs, des lois analogues à celles des anneaux colorés, c'est-à-dire, que *les épaisseurs de deux lames cristallisées*, de même nature, qui donnent deux teintes quelconques, sont entre elles comme *les épaisseurs des lames d'air* qui réfléchissent des teintes semblables dans les anneaux colorés.

555. M. Arago a encore reconnu que la lumière qui émane des corps incandescens, *si ces corps sont solides ou liquides* (platine chauffé au rouge, verre en fusion), est *partiellement polarisée par réfraction* quand les rayons observés forment avec la surface de sortie un angle d'un petit nombre de degrés. Quant à la lumière émanée des gaz enflammés, elle ne présente, sous aucune inclinaison, des traces sensibles de polarisation. M. Arago conclut de ce fait qu'une portion notable de la lumière qui nous fait voir les corps incandescens, se forme dans leur intérieur. Il montre que le même moyen d'observation peut être appliqué à l'étude de la constitution physique du soleil : les résultats qu'il a déjà obtenus dans cette recherche confirment les conjectures de Bode, de Schoëter, d'Herschel, *sur l'existence d'une atmosphère solaire*.

Voyez les halos pour une application analogue de la polarisation.

Il existe sans doute beaucoup d'autres faits sur la polarisation de la lumière. Nous devons nous borner, dans un ouvrage élémentaire, à faire connaître les plus importans. Les lecteurs qui désireraient plus de détails sur cette partie de la physique, les trouveraient dans l'ouvrage de Malus et dans les *Annales de physique et de chimie.*

Système des Ondulations.

556. Nous avons exposé les phénomènes de l'optique dans l'hypothèse de l'émission; mais nous ne croyons pas pouvoir nous dispenser, en terminant l'histoire de ces phénomènes, de donner une idée succincte d'un système adopté par plusieurs physiciens, système qui a produit depuis quelques années de si nombreuses et de si belles recherches.

Descartes, Huyghens, Euler, et un grand nombre de physiciens, ont admis que la sensation de la lumière est produite par des ondulations excitées dans un milieu très-élastique (qu'ils ont appelé *éther*), de la même manière que se fait la transmission du son dans l'air et dans les gaz. Cet éther remplit tous les espaces célestes; il jouit d'une ténuité et d'une élasticité extrêmes; il pénètre dans tous les corps, et y existe probablement à un degré particulier de densité pour chacun deux.

L'*intensité de la lumière* dépend de l'*intensité des vibrations de l'éther*, et *sa nature*, c'est-à-dire la sensation de la couleur qu'elle produit, dépend de la *durée des oscillations* ou de la *longueur d'ondulation*, qui est toujours proportionnelle à cette durée.

557. L'ébranlement produit en un point quelconque d'un fluide d'une densité et d'une élasticité uniformes, doit se propager dans tous les sens avec la même vitesse.

Il suit de là que tous les points ébranlés, au même instant, doivent être sur une surface sphérique, ayant pour centre l'origine de l'ébranlement. Cette surface sphérique est la surface de l'onde.

On appelle *rayons*, les lignes droites menées du centre d'ébranlement aux différens points de cette surface sphérique. Ce sont les directions de la propagation du mouvement.

Une *oscillation lumineuse* se compose de l'aller et du retour. Ainsi une molécule d'éther étant mise en mouvement dans le sens ab, l'oscillation est le chemin ab, plus le chemin ba (*fig.* 370).

Pour définir ce qu'on entend par *longueur d'ondulation*, considérons ce qui se passe dans la masse fluide. Le mouvement se propage à partir du centre d'ébranlement avec une vitesse très-grande, mais non pas infinie. Il y aura donc des portions du fluide assez éloignées du centre d'ébranlement pour être encore en repos lorsque la molécule ébranlée la première, aura fait toute une oscillation. Cette distance, à laquelle le mouvement commencera à se faire sentir à l'instant où la molécule située au centre d'ébranlement sera revenue à sa position initiale, et recommencera une seconde oscillation, est ce qu'on appelle *longueur d'ondulation*.

De plus, il résulte de la définition même, que deux molécules situées sur un même rayon lumineux à une distance l'une de l'autre d'une longueur entière d'ondulation, continueront pendant toute la durée du mouvement à avoir aux mêmes instans des vitesses égales, dirigées dans le même sens. La figure 370 montre les molécules ab et $a''\ b''$, distantes d'une ondulation entière. A une distance du centre d'ébranlement égale à la moitié de ce qu'on vient d'ap-

peler longueur d'ondulation, le mouvement oscillatoire commence à se faire sentir à l'instant où la molécule primitivement ébranlée, parvenue à l'extrémité d'une demi-oscillation, revient à sa position primitive par un mouvement en sens contraire. Deux molécules situées sur un rayon lumineux à une distance égale à une demi-ondulation, commenceront et continueront donc à se mouvoir aux mêmes instans avec des vitesses égales, et dirigées en sens contraire.

Pour concevoir ce changement de signe dans la direction, soit $a\,b$ (*fig.* 370) la première molécule ébranlée; elle communiquera son mouvement à la seconde molécule, puis à la troisième, et ainsi de suite. Mais comme la seconde molécule ne sera ébranlée qu'après la première, celle-ci reviendra vers sa position initiale, lorsque l'autre oscillera encore dans le sens primitif $e\,f$ ou $a\,b$. Puisque les molécules successivement ébranlées sont en retard les unes sur les autres, il se trouvera une molécule $a'\,b'$ qui commencera à se mouvoir dans le sens $a'\,b'$, lorsque la première reviendra dans le sens $b\,a$. La distance $C\,H$ est la demi-ondulation.

Les ondes lumineuses se propagent avec une vitesse uniforme; cette vitesse est le rapport constant de l'espace parcouru au temps employé à le parcourir; soit donc λ la longueur d'une ondulation lumineuse, t le temps que le mouvement met à se propager d'une extrémité à l'autre de cette ondulation, et qui est conséquemment la durée d'une oscillation lumineuse active. Soit D la distance de la terre au soleil; T le temps que la lumière emploie à parcourir cette distance; soit enfin A la vitesse de propagation de la lumière, on aura $A = \frac{D}{T} = \frac{\lambda}{t}$. Mais $D = 35{,}000{,}000$

lieues; $T = 8',13''$; et les expériences de la diffraction ou des anneaux colorés, donnent $\lambda = 0^{mm},00055$ pour les rayons jaunes : d'où $t = \frac{\lambda}{D} \times T$, en remplaçant λ, D et T par leurs valeurs, on aurait t en fractions de secondes.

Il ne faut pas confondre la vitesse absolue des molécules du fluide, avec la vitesse de propagation du mouvement. La première varie selon l'amplitude des oscillations d'une égale durée; la seconde qui n'est autre chose que la promptitude avec laquelle le mouvement se communique d'une tranche à une autre, est indépendante de l'intensité des vibrations. C'est pour cela que la lumière intense se propage avec la *même rapidité* que la lumière la plus faible.

Principe des Interférences.

558. Grimaldi avait remarqué l'influence mutuelle des rayons; mais le docteur Young est le premier qui ait démontré que, dans certaines circonstances, *la lumière ajoutée à de la lumière, produit de l'obscurité*, et qui ait fait connaître la loi de ce singulier phénomène, auquel il a donné le nom de *phénomène des interférences*.

Cette loi consiste en ce que deux rayons, partis d'une source commune et se rencontrant sous des directions peu inclinées entre elles, se détruisent mutuellement quand il y a entre les longueurs des chemins qu'ils ont parcourus un nombre impair de fois la longueur d'une demi-ondulation. Quand la différence de marche au contraire est nulle ou contient un certain nombre pair de fois cette même longueur, les deux rayons se renforcent mutuellement et la lumière résultante est à son *maximum*.

La production de l'obscurité, par l'addition de deux

rayons lumineux, est une des plus fortes objections qu'on ait opposées à l'hypothèse de l'émission.

On sent, par la production du phénomène, la nécessité de faire partir d'une même source les deux systèmes de rayons destinés à le produire.

On peut assimiler les interférences des ondes à ce qui se passe dans une eau tranquille, quand on y jette quelques corps solides; tout le monde a remarqué que lorsque deux groupes d'ondes se croisent sur la surface de l'eau, il y a des points de rencontre où elle reste immobile; qu'il y en a d'autres où le liquide s'abaisse ou s'élève d'une manière notable. Les premiers sont ceux où le mouvement dans chaque système, à un instant quelconque, aurait lieu en sens contraire et avec des vitesses égales, si chacun de ces systèmes se propageait isolément. Dans les autres les mouvemens conspirent, et le liquide est poussé en bas ou en haut par deux ondes égales ou inégales en intensité. Entre ces deux points d'un accord parfait et d'une opposition complète, qui présentent, les uns une absence totale de mouvement, et les autres le maximum d'oscillation du liquide, il est une infinité de points intermédiaires où le balancement ondulatoire s'exécute avec plus ou moins d'énergie, selon qu'ils se rapprochent davantage de l'accord parfait ou de l'opposition des deux mouvemens qui s'y rencontrent.

Quoique les ondes qui se propagent dans un fluide élastique soient bien différentes de celles dont il vient d'être question, en tant qu'elles dépendent de l'élasticité du fluide, tandis que les premières dépendent de la pesanteur du liquide; cependant, les résultats produits par les interférences sont tout-à-fait analogues.

Dans les ondes formées à la surface d'un liquide, l'oscillation se fait verticalement, tandis que les ondes se propagent horizontalement; on avait admis généralement jusque dans ces derniers temps, que les oscillations lumineuses se faisaient dans le sens même de la propagation des ondulations, comme cela paraît avoir lieu dans les ondes sonores. Les expériences de MM. Arago et Fresnel, que nous avons rapportées n° 553, ont fait penser que la direction des oscillations est perpendiculaire à la direction suivant laquelle la lumière se propage. Ce qui est d'ailleurs d'accord avec les expériences et les calculs de M. Fresnel sur la quantité de la lumière réfléchie par une glace non étamée, lorsque ce rayon incident est polarisé dans différens sens, et qu'il forme avec la surface réfléchissante des angles différens.

559. Parmi les différentes expériences propres à produire le phénomène des interférences, la suivante, que nous puisons dans un écrit de M. Fresnel, nous paraît devoir être choisie de préférence.

On fait tomber sur deux miroirs, légèrement inclinés entre eux, les rayons divergens qui émanent d'un même point lumineux; les rayons sont réfléchis de manière à produire deux faisceaux qui se rencontrent sous un angle très-petit; il résulte de cette légère obliquité, que si une demi-ondulation du premier système coïncide parfaitement en un point avec une demi-ondulation du second qui pousse le fluide dans le même sens, elle s'en sépare à gauche et à droite de ce point d'intersection, et coïncide un peu plus loin, d'un côté, avec la demi-ondulation du mouvement contraire qui précède celle-ci, et de l'autre, avec celle qui la suit, puis s'en sépare encore,

et, à une distance double de la première, coïncide de nouveau avec deux demi-ondulations, dont les impulsions agissent dans le même sens que la sienne; d'où il résulte, sur la surface de cette onde, une série de lignes également espacées, où son mouvement est alternativement détruit, et renforcé par les ondes de l'autre faisceau; de sorte que si l'on reçoit cette onde lumineuse sur un carton blanc, on doit y apercevoir une suite de bandes obscures et brillantes, si la lumière est homogène, ou de teintes diverses, si l'on emploie la lumière blanche, car les points où les rayons s'accordent ne seront pas les mêmes pour les différentes couleurs.

La figure 371 représente une section des deux miroirs et des ondes réfléchies, faite par un plan mené du point lumineux perpendiculairement à ces miroirs projetés en ED et DF. Le point lumineux est en S; A et B représentent les positions géométriques de ses deux images; déterminées, comme il a été indiqué (n° 433) en menant des perpendiculaires SB et SA, et prenant $QB = SQ$ et $AP = SP$. En effet, c'est vers A et B ainsi déterminés, que convergent les rayons réfléchis sur le premier et le second miroirs, d'après la loi de la réflexion. Ainsi, pour avoir le rayon réfléchi en un point G quelconque du miroir DF, il suffit de joindre B et G par une droite, et cette droite prolongée sera le rayon réfléchi. Or, d'après la construction qui nous a donné la position du point B, les distances SG, et BG sont égales; et qu'ainsi le chemin total parcouru par le rayon parti du point S, et qui arrive en b, est absolument le même que si ce rayon était parti du point B. Cette conséquence s'appliquant à tous les autres rayons réfléchis

par le même miroir, ils devront arriver en même temps sur la circonférence $n' b m$, décrite du point B avec $B b$ pour rayon. Cette circonférence représentera donc l'intersection de la surface de l'onde réfléchie arrivée en b, et du plan de la figure. Les ondes réfléchies par le miroir $E D$ auront pareillement leur centre en A.

Pour figurer les deux systèmes d'ondes réfléchies, on décrit des points A et B, comme centres des arcs de cercles séparés les uns des autres par un intervalle constant et égal à une demi-oscillation. Afin de distinguer les différens mouvemens, on a tracé en lignes pleines les arcs de cercles sur lesquels les molécules éthérées sont supposées animées du maximum de vitesse en avant, et l'on a ponctué ceux sur lesquels les molécules éthérées ont le maximum de vitesse en arrière. D'où il suit que les intersections des arcs de cercle ponctués avec les arcs pleins, sont les points de discordance complète et par conséquent les milieux des bandes obscures; et au contraire les intersections des arcs semblables donnent les points d'accord parfait, ou les milieux des bandes brillantes. Les intersections correspondantes des arcs de même espèce sont joints par des lignes ponctuées $b p$, $b' p'$, $b' p'$, et les intersections correspondantes des arcs d'espèces contraires le sont par des lignes pleines $n o$, $n' o$, $n' o'$.

Dans la figure, la longueur réelle des ondes lumineuses, l'inclinaison respective des deux miroirs, sont beaucoup exagérées.

560. A l'aide de considérations géométriques très-simples, nous pouvons reconnaître que la largeur de ces franges est en raison inverse de la grandeur de l'angle

des deux faisceaux interférans, et que l'intervalle des milieux de deux bandes obscures ou de deux bandes brillantes consécutives, est égal à la longueur d'ondulation divisée par le sinus de l'angle sous lequel se croisent les rayons.

En effet, le triangle bni formé par la ligne droite bi et par les deux arcs de cercle ni et nb, peut être considéré comme rectiligne et isocèle à cause de la petitesse de ces arcs, et le sinus de l'angle bni, vu la petitesse de cet angle, est sensiblement égal à $\frac{ib}{bn}$; donc bn est égal à ib divisé par sin bni. Mais l'angle bni a ses côtés perpendiculaires à ceux de l'angle AbB, puisque bn est perpendiculaire sur Ab, et ni sur Bb; donc ces deux angles sont égaux, et l'on peut substituer l'un à l'autre; ainsi en représentant par i l'angle AbB sous lequel se croisent les rayons réfléchis, on a $bn = \frac{ib}{\sin i}$; donc nn, qui est le double de bn, sera égal à $\frac{2\,ib}{\sin i}$. Mais nn est la distance entre les milieux de deux bandes obscures consécutives, et par conséquent c'est là ce qu'on appelle la largeur d'une frange; ib étant la longueur d'une demi-ondulation, d'après la construction de la figure $2\,ib$ est la longueur d'une ondulation entière : donc la *largeur d'une frange* est effectivement *égale à la longueur d'ondulation divisée* par *le sinus de l'angle que font entre eux les rayons réfléchis*, qui est en même temps l'angle sous lequel on verrait l'intervalle AB compris entre les deux images du point lumineux, en plaçant son œil en b.

De la réflexion et de la réfraction.

561. Il nous reste à faire voir comment on peut expliquer la réflexion et la réfraction de la lumière dans l'hypothèse des ondulations. Commençons par la réflexion.

La loi de ce phénomène est que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence; il nous faut démontrer qu'il en doit être ainsi d'après la nature qu'on suppose à la lumière dans le système des ondulations.

Soient *F G* et *E D* (*fig.* 372) deux rayons tombant sur une surface *A B*, partis du même centre d'oscillation que nous supposerons à une distance infinie, en sorte que ces rayons sont parallèles entre eux, et que la surface d'une onde lumineuse soit un plan perpendiculaire à la direction du rayon incident. Menons par le point *G* la ligne droite *G I* perpendiculaire aux rayons *E D* et *F G*. *G I* sera la direction de l'onde incidente au moment où elle rencontrera la surface réfléchissante en *G*. Nous pouvons considérer chacun des points *D* et *G* où les rayons viennent frapper la surface *A B*, comme des centres d'ébranlement, qui envoient des rayons dans une infinité de directions, et avec des intensités différentes. Il s'agit de reconnaître ceux qui satisfont à la condition de visibilité, c'est-à-dire ceux qui s'accordent comme les deux rayons *F G* et *E D* s'accordaient avant la réflexion. Ces rayons doivent être évidemment parallèles, et ne pourront être en retard l'un sur l'autre d'aucune fraction d'ondulation.

Considérons donc deux rayons parallèles quelconques *G K* et *D L*. Il est clair qu'il faudra que le nombre d'oscillations, exécuté par le rayon *F G*, en allant de *G* en *C*, soit égal au nombre d'oscillations exécutées par le rayon

E D, en allant de *I* en *D* : *G C* égale donc *I D*; les deux triangles *I G D* et *C G D*, rectangles en *I* et en *C*, sont donc égaux : l'égalité de ces deux triangles entraîne celle des angles *C G D*, *I D G*, et *F G A*; donc la condition de l'accord des rayons est la loi connue, c'est-à-dire l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, *F G A* et *K G D*.

Il n'en est plus ainsi pour des rayons qui ne font pas l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. En effet, soient *G k* et *D l* deux rayons parallèles, faisant avec la surface *A B* un angle différent de *E D A*; alors l'intervalle compris entre le point *G* et le pied de la perpendiculaire *D c*, n'étant plus égal à *I D*, les chemins parcourus par les rayons ne sont plus égaux, et leurs vibrations doivent être plus ou moins discordantes : or, on peut toujours prendre le point *G* à une telle distance du point *D*, que la différence entre *G c* et *I D* soit égale à une demi-ondulation; ce qui établira une discordance complète entre les vibrations réfléchies suivant *G k* et *D l*, et, comme elles sont d'ailleurs d'intensités égales, elles se détruiront mutuellement; et par conséquent il n'y aura pas de lumière propagée dans cette direction.

Si réellement le rayon *D l* est neutralisé dans ce cas par le rayon qui vient du point *G*, on n'a qu'à supprimer ce dernier, le rayon *D l* devra conserver la faculté de paraître; de sorte que les rayons élémentaires, réfléchis en *G*, peuvent diverger d'autant plus que la surface est plus rétrécie de chaque côté de ce point. Voici de quelle manière M. Fresnel soumet à l'épreuve de l'expérience, cette conséquence de la théorie. Il fait tomber, dans une chambre obscure, les rayons d'un point lumineux sur un miroir métallique, dont on a recouvert la surface supérieure d'un

noir mat, à l'exception d'un espace un peu long et très-étroit, compris entre deux lignes qui font entre elles un angle très-aigu, de manière que la largeur de l'espace réfléchissant va continuellement en diminuant, jusqu'au point de concours de ses bords. Si l'on reçoit sur un carton blanc la lumière réfléchie, on remarquera que le faisceau réfléchi par la partie voisine du sommet de l'angle est beaucoup plus large que celui qui vient de la partie opposée; et conséquemment la divergence des rayons réfléchis est d'autant plus grande, que l'espace réfléchissant est plus étroit.

Cette manière d'envisager la réflexion a encore l'avantage de donner une idée nette de ce qui constitue le poli spéculaire.

562. On explique la loi de la réfraction d'une manière analogue : soit AB (*fig.* 373) la surface de séparation des deux milieux; soient FG et ED les rayons incidens, partis d'un point infiniment éloigné, et par conséquent parallèles entre eux. Menons par le point G la ligne GI perpendiculaire, aux rayons incidens, les mouvemens correspondans des ondulations des deux rayons incidens arriveront simultanément en G et en I; de même si nous considérons les rayons réfractés parallèles GK et DL, partis des points G et D, et si nous menons la perpendiculaire DM; pour que les deux rayons soient d'accord, il faudra que l'intervalle GM soit parcouru dans le même temps que l'intervalle ID. Il est clair qu'il faut pour cela que ces deux espaces soient dans le même rapport que les vitesses de propagation ou les longueurs d'ondulation de la lumière dans les deux milieux; ainsi, en représentant par l et l' les longueurs d'ondulation dans le premier et le

second milieux, on devra avoir $GM : DI :: l' : l$, mais $ID = GD \sin IGD$, et $GM = GD \sin GDM$; or IGD est égal à IDP, angle d'incidence, et GDM est égal à QDL, angle de réfraction, d'où $\sin i : \sin r :: l : l'$, d'où il suit que l'accord des rayons exige que les sinus de l'angle d'incidence et de l'angle de réfraction soient dans le rapport des longueurs des ondulations, c'est-à-dire dans un rapport constant pour le même milieu dans la théorie des ondes, ce qui est la loi connue.

On démontrerait, comme dans le cas précédent, que tous les rayons pour lesquels ce rapport n'a pas lieu doivent se détruire.

Huyghens et après lui Euler, ont donné des explications des lois de la réflexion et de la réfraction; celles que nous présentons ici sont tirées d'un mémoire de M. Fresnel (*An. ch. et phys.*, t. I). *Voyez* aussi le même Journal, t. XXI.

Il doit être remarqué que le rapport que nous venons de trouver entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction, est tout-à-fait d'accord avec ce que nous obtiendrons par les anneaux colorés, qui nous montreront que les longueurs d'ondulation d'une même espèce de lumière dans deux milieux différens sont dans le même rapport que les sinus des angles d'incidence et de réfraction pour le passage de la lumière d'un des milieux dans l'autre.

Voyez la discussion qui a eu lieu entre M. Poisson et M. Fresnel, relativement à la théorie des ondes (*An. ch. et phys.*, t. XXIII).

De la Diffraction.

565. On donne le nom de diffraction de la lumière à

ces modifications qu'elle éprouve par son passage auprès des extrémités des corps.

Grimaldi est le premier physicien qui les ait observées et étudiées avec soin.

Si l'on introduit un faisceau de lumière dans une chambre obscure, par une ouverture d'un très-petit diamètre, on remarque que les ombres des corps, au lieu d'être terminées nettement et d'une manière tranchée, comme cela devrait arriver si la lumière marchait toujours en ligne droite, sont bordées de trois franges colorées bien distinctes, dont les largeurs sont inégales, et vont en diminuant de la première à la troisième; quand le corps interposé est assez étroit, comme un fil de fer très-fin, on aperçoit même des franges dans son ombre, qui paraît alors partagée par des bandes obscures et des bandes plus claires, placées à des distances égales les unes des autres. Ces dernières sont les franges *intérieures;* les premières sont les franges *extérieures.*

Pour constater la formation des franges, introduisez un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, par une ouverture étroite. Nous supposerons cette ouverture faite dans une feuille métallique, et qu'elle ait un dixième de millimètre au plus. Nous supposerons aussi que, par le moyen d'un miroir plan, ce faisceau lumineux soit réfléchi dans une direction horizontale. Placez à un mètre de distance un fil de fer ayant un millimètre de diamètre, vous aurez à trois mètres du trou, et conséquemment à deux mètres du fil, l'ombre de ce dernier sur un carton. Si le trou était infiniment petit, et si le point lumineux était un point mathématique, l'ombre du fil projetée sur le carton aurait trois millimètres de lar-

geur (*fig.* 374). Mais dans notre expérience, la largeur du trou diminue l'ombre pure; et puisque le diamètre de ce trou est d'un dixième de millimètre, les rayons extrêmes partis des bords sont éloignés des rayons partis du centre d'un vingtième de millimètre; et puisque le carton est deux fois plus éloigné du fil de fer que celui-ci du point lumineux, l'ombre pure (*fig.* 375) sera d'un dixième de millimètre de chaque côté, et sera réduite à $2^{mm},8$. Cet espace serait complétement privé de lumière, si les rayons n'éprouvaient aucune inflexion dans l'intérieur. Or, si vous faites l'expérience avec attention, vous découvrirez dans l'ombre pure des bandes légèrement éclairées.

Newton s'est occupé après Grimaldi de la diffraction. Il est singulier que les franges intérieures aient échappé à un aussi habile observateur.

Il est difficile d'expliquer les franges intérieures et extérieures dans le système de l'émission; car, dans ce système, il semblerait que la nature et la forme du corps dussent avoir une influence. Cependant des expériences précises prouvent que les bandes diffractées ont le même éclat et la même disposition, soit qu'elles aient été produites sur le dos ou sur le tranchant d'un rasoir (M. Fresnel) (1).

Un résultat qui ne paraît pas non plus se concilier avec le même système, c'est que les franges présentent une courbure sensible dans plusieurs mètres de longueur.

---

(1) Il résulte aussi des expériences faites par Malus et par Bertholet, que les effets diffractifs des diverses matières sont sensiblement les mêmes.

564. M. le docteur Young a démontré, par une expérience très-simple, que le concours de deux faisceaux lumineux était nécessaire pour la formation des franges situées dans l'intérieur. Cette expérience consiste à intercepter par un écran toute la lumière qui vient d'un des côtés du corps étroit; par cette interposition, les franges intérieures disparaissent complétement. Dans l'hypothèse de l'émission, chaque faisceau répandant dans l'intérieur de l'ombre une lumière continue, la réunion de deux faisceaux devrait également la produire, si ces faisceaux se mélangeaient simplement, et n'exerçaient aucune influence l'un sur l'autre.

Le même savant démontre encore l'influence mutuelle de deux rayons lumineux, en faisant passer la lumière d'un point radieux par deux trous très-rapprochés. Il observe, dans la partie intermédiaire, des lignes obscures et brillantes, résultant évidemment de l'action de ces deux faisceaux l'un sur l'autre, puisqu'elles disparaissent dès qu'un des trous est bouché.

565. M. le docteur Young avait expliqué la formation des franges extérieures par l'interférence des rayons directs et des rayons réfléchis sur les bords. L'expérience du rasoir, faite par M. Fresnel, et rapportée plus haut, est contraire à cette explication; car, si l'explication était fondée, le dos du rasoir, réfléchissant plus de lumière que le tranchant, fournirait des tranches plus brillantes, ce qui n'a point lieu. Les franges produites dans les deux cas, ont sensiblement la même intensité, du moins quand on ne les observe pas trop près du rasoir.

M. Fresnel, pour expliquer ces franges, considère, d'après le principe des petits mouvemens, chaque point de

l'onde lumineuse incidente, comme étant lui-même centre d'ondulation, qui envoie des rayons dans des directions diverses, ces rayons ont sans doute beaucoup plus d'intensité dans le sens du mouvement primitif que dans les directions qui s'en éloignent d'une manière notable; mais il suffit pour l'explication et les calculs qui s'en déduisent, qu'on puisse regarder ces rayons comme ayant des intensités sensiblement égales pour ces inclinaisons légères. En calculant l'intensité de la lumière qui résulte de l'influence mutuelle de tous les rayons élémentaires partis des divers points de l'onde incidente, ce savant académicien a trouvé qu'il devait y avoir effectivement des bandes obscures et brillantes en dehors de l'ombre des corps et dans leur intérieur lorsqu'elles sont étroites. La position et la largeur des franges données par le calcul, sont précisément les mêmes que celles que fournit l'observation.

566. M. Fresnel, pour mesurer la largeur des franges des arcs des ombres, emploie une petite loupe mobile, portant à son foyer un fil très-fin, qui sert de point de mire, et dont il évalue les déplacemens à l'aide d'un vernier ou d'une vis micrométrique. En déterminant les distances qui séparent les bandes de même ordre des deux côtés de l'ombre du corps, et en comparant ces distances aux différens points des courbes, on reconnaît que les franges extérieures, obscures ou colorées, suivent dans leurs trajets des hyperboles d'une courbure sensible, ce qui s'accorde cependant très-bien avec la propagation de la lumière en ligne droite.

567. Ces expériences de diffraction ont été faites avec de la lumière simple et avec de la lumière solaire. Dans le pre-

mier cas on obtient des franges obscures et des franges de la couleur employée; dans le second, les franges obscures et brillantes présentent une succession de teintes semblables à celles des anneaux colorés. (Voyez *An. de ph. et de ch.*, t. 11, le Mémoire *de M. Fresnel sur* la diffract.).

568. Nous rapporterons une expérience de M. Arago, qui montre bien l'influence des chemins parcourus relativement à la concordance des rayons, et qui fournit le moyen de mesurer les plus légères différences de pouvoir réfringent des corps, avec une précision pour ainsi dire indéfinie.

Les franges produites par deux fentes très-fines, sont toujours placées d'une manière symétrique, relativement au plan mené par le point lumineux, et le milieu de l'intervalle compris entre les deux fentes, tant que les deux pinceaux de lumière qui interfèrent ont traversé le même milieu, l'air par exemple, comme cela arrive dans le cas ordinaire des appareils. Mais si l'un des faisceaux n'ayant traversé que l'air, l'autre rencontre sur son passage un corps plus réfringent, tel qu'une lame mince de verre soufflé, etc., alors les franges sont déplacées et portées du côté du faisceau qui a traversé la lame transparente; et même dès qu'elle a un peu d'épaisseur, elles sortent de l'espace éclairé et disparaissent. Cette expérience peut se réaliser avec l'appareil des deux miroirs, en plaçant la lame mince sur le passage de l'un des faisceaux avant ou après la réflexion.

Voici la conséquence qui se déduit de ce fait important. Le milieu de la bande centrale provient de l'arrivée simultanée des rayons partis en même temps du point lumi-

neux. Ils ont donc dans le cas ordinaire traversé le même milieu et parcouru des chemins égaux; mais si l'un des deux faisceaux éprouve une diminution dans la route, il arrivera plus tard au point de concours, qui ne sera plus le milieu de la bande centrale. Cette dernière se rapprochera du faisceau qui a marché le plus lentement, et réciproquement lorsque les franges sont portées à droite ou à gauche; on en conclut que le faisceau du côté duquel elles se sont avancées, a été retardé dans sa marche. Ainsi, la conséquence naturelle de cette expérience est que la lumière se propage plus vite dans l'air que dans le verre et les corps plus réfringens que l'air. Résultat opposé à la théorie de Newton, d'après laquelle les molécules lumineuses étant fortement attirées par les corps denses, doivent y acquérir une plus grande vitesse que dans les corps rares. Supposons maintenant qu'à l'aide du sphéromètre (n° 55), on détermine l'épaisseur de la lame mince, et qu'avec un micromètre on mesure le déplacement des franges : sachant qu'avant l'interposition de la lame, les chemins parcourus étaient égaux pour le milieu de la bande centrale, on pourra déterminer par le calcul, la différence de leurs longueurs pour sa nouvelle position. Elle sera le retard éprouvé par la lumière dans la lame de verre dont l'épaisseur est connue. Cette épaisseur ajoutée à la différence calculée, sera égale au chemin que parcourrait l'un des faisceaux dans l'air, tandis que l'autre parcourrait la lame de verre. Ce chemin, comparé à l'épaisseur de la lame de verre, donnera le rapport de la vitesse de la lumière dans l'air, à la vitesse de la lumière dans le verre.

Le procédé de M. Arago a surtout une grande supériorité sur la méthode directe, dans le cas où il s'agit de dé-

terminer de légères vitesses de la lumière dans des milieux qui la réfractent presque également. Pour donner une idée de la précision de ce procédé, il suffira de remarquer que la longueur des ondulations des rayons jaunes dans l'air, est de $0^{mm},00055$, ainsi il y en a 2,000,000 dans $1^{m},10$. Car $\frac{1^{m},10}{0^{mm},00055} = 2,000,000$. Or il est aisé d'apercevoir une différence de $\frac{1}{3}$ de frange, qui répond à un retard ou à une accélération de $\frac{1}{3}$ d'ondulation dans la marche de la lumière, et comme il y en a deux millions dans $1^{m},10$ le $\frac{1}{3}$ d'une ondulation ne serait que la dix-millionième partie de cette longueur. MM. Arago et Fresnel, en faisant passer la lumière à travers un tube à $1^{m},10$ rempli successivement d'air et d'air saturé à 30°, ont reconnu que la vapeur d'eau possède un pouvoir réfringent supérieur à celle de l'air.

Histoire expérimentale des anneaux colorés.

569. On fera d'abord l'exposé expérimental des phénomènes connus sous le nom d'*anneaux colorés*. On indiquera ensuite l'explication de ces phénomènes, 1° dans le système de l'émission telle qu'elle a été proposée par Newton; 2° dans le système des ondes.

Si l'on reçoit un faisceau élémentaire dans une chambre obscure, et qu'on le dirige sur une lentille placée d'avance sur un verre plan, on observera les faits suivans (*fig.* 376).

L'œil étant tellement situé qu'on ne reçoive que la lumière transmise par réflexion, on verra une tache noire au point de contact des deux verres; cette tache sera environnée d'un anneau coloré; après lequel viendra un

anneau obscur, à celui-ci succédera un anneau coloré, et ainsi de suite. Quelle que soit la couleur du faisceau soumis à cette épreuve, on observera la succession des anneaux colorés et obscurs.

Si l'on se place de manière à recevoir la lumière par transmission, la couleur observée au point de contact sera celle du faisceau élémentaire; viendra ensuite un anneau obscur; puis un anneau coloré, etc. (*fig.* 377).

Pour obtenir un faisceau élémentaire, on fait arriver un faisceau solaire sur un prisme convenablement disposé, et l'on intercepte au moyen d'un carton, toutes les couleurs à l'exception d'une seule.

570. Il serait presque impossible de mesurer directement les épaisseurs des lames d'air qui fournissent les différens anneaux, tant obscurs que colorés; mais heureusement la connaissance des diamètres suffit pour trouver les épaisseurs. En effet, soit $M\ C\ N$ le verre plan (*fig.* 378), $E\ C\ A$, la base inférieure du verre convexe, dont le diamètre est $C\ D$; si l'on considère deux anneaux dont les rayons soient $B\ A$ et $B'\ A'$, les épaisseurs correspondantes des lames d'air seront $C\ B$ et $C\ B'$. Or, par la propriété du cercle, on a $B\ D \times C\ B = B\ A^2$; $B'\ D \times C\ B' = B'\ A'^2$, d'où $C\ B : C\ B' :: B\ A^2 : B'\ A'^2$; car les lignes $B\ D$ et $B'\ D$ différant peu entr'elles et étant facteurs, peuvent être supprimées sans altérer le rapport. Il résulte de ce calcul que les épaisseurs des lames d'air sont comme les carrés des diamètres. Newton mesura les diamètres des anneaux colorés réfléchis : il trouva que leurs carrés étaient comme les nombres 1, 3, 5, 7, etc.

Les carrés des diamètres des anneaux colorés transmis furent trouvés dans le rapport des nombres 2, 4, 6, 8, etc.

Il s'ensuit que les épaisseurs des lames d'air propres à laisser réfléchir une même couleur, suivent entr'elles les rapports 1, 3, 5, 7, 9, etc.; et que les épaisseurs de celles qui sont propres à la transmettre sont dans les rapports 2, 4, 6, 8, 10, etc., série dans laquelle il faut comprendre l'épaisseur nulle du centre, la couleur étant toujours transmise au point de contact des verres. Tous ces nombres sont relatifs aux points les plus brillans ou les plus obscurs.

Les rapports sont les mêmes pour toutes les couleurs et pour toutes les substances : seulement pour chaque couleur et pour chaque substance, la valeur absolue d'une épaisseur d'un rang déterminé, est exprimée par un nombre particulier. Ainsi les anneaux formés par la couleur rouge, ont des diamètres sensiblement plus grands que les anneaux formés par la couleur violette.

571. Si l'on expose l'appareil à la lumière blanche, les diverses couleurs simples forment toutes à la fois leurs anneaux; mais ces anneaux ayant des diamètres inégaux, anticipent les uns sur les autres, ce qui produit les séries successives des cercles colorés. Ces anneaux diminuent d'intensité à mesure qu'on s'éloigne du centre, et finissent par ne plus être aperçus par l'œil. On s'assure cependant de leur existence à l'aide du prisme; en les regardant à travers un prisme, on aperçoit un bien plus grand nombre de rayons qu'en regardant à l'œil nu, parce que ceux qui étaient trop rapprochés étant inégalement déplacés par l'effet de la réfraction, se trouvent suffisamment séparés pour être distincts les uns des autres.

572. Par le calcul ci-dessus et par la connaissance du diamètre de la sphère à laquelle appartient le verre con-

vexe, on détermine la valeur absolue d'une épaisseur pour une couleur soumise à l'expérience. En effet (n° 569) une épaisseur $CB = \frac{BA^2}{BD}$, BA est le diamètre de l'anneau qu'on mesure directement, et BD est très-peu différent du diamètre de la sphère à laquelle appartient la lentille. C'est ainsi que Newton a trouvé que pour un verre convexe appartenant à une sphère dont le diamètre était égal à 182 pouces, le premier anneau obscur correspond à une épaisseur de $\frac{1}{88739}$ de pouce.

573. Si l'on place de l'eau entre les deux verres, on observe toujours les anneaux, mais ils sont plus rapprochés du centre; et si l'on prend les mesures des diamètres de deux anneaux d'un même rang et d'une même couleur produits par l'eau et par l'air, on trouve qu'ils sont dans le rapport de 7 à 8, et conséquemment que les épaisseurs des anneaux sont dans le rapport de 49 à 64, ou à très-peu près de 3 à 4, c'est-à-dire dans celui du sinus d'incidence au sinus de réfraction, lorsque la lumière passe de l'air dans l'eau. Newton suppose cette loi générale : l'épaisseur d'une lame mince qui réfléchit une certaine couleur, est à l'épaisseur de la lame d'air qui réfléchit la même couleur, dans le rapport du sinus de réfraction au sinus d'incidence, lorsque la lumière passe de l'air dans le corps.

Quelques corps solides, tels que les micas, le sulfate de chaux, peuvent être amincis au point de produire les couleurs des anneaux, et l'on détermine l'épaisseur d'une lame par la couleur qu'elle fournit, si l'on connaît préalablement le rapport de réfraction de la substance.

574. En regardant les anneaux colorés produits par

une lame d'eau, on a fait une remarque importante, c'est que les diamètres de ces anneaux ne varient pas d'une manière très-sensible avec l'inclinaison des rayons qui les produisent; tandis que ceux des anneaux formés par une lame d'air diminuent à mesure que l'obliquité devient plus grande. On se rend raison de cette différence en faisant attention que le rayon de lumière qui arrive sur la lame mince, sort du verre et s'écarte peu de sa direction primitive, quand il traverse une lame d'eau, de sorte que le chemin parcouru entre les deux verres sera à peu près le même, quelle que soit l'inclinaison; et comme c'est le chemin parcouru qui détermine la production de telle ou telle couleur, on voit que cette dernière devra peu varier avec l'obliquité des rayons, tandis que pour une lame d'air le rayon s'écarte beaucoup de sa direction primitive, en s'éloignant de la perpendiculaire, ce qui fait qu'il devient plus oblique, et que pour qu'il parcoure le même chemin entre les deux verres, il faut qu'il les traverse plus près du point de contact, ce qui diminue le diamètre des anneaux colorés.

575. Newton appelle *accès de facile réflexion* les dispositions successives et périodiques d'un même rayon à être réfléchi par les différentes épaisseurs d'une lame, d'une substance quelconque; et *accès de facile transmission* les dispositions d'un même rayon à être transmis par les épaisseurs intermédiaires. Ainsi, en appelant e la plus petite épaisseur d'un corps capable de réfléchir le rayon jaune; ce rayon est dans un accès de facile réflexion pour toutes les épaisseurs $3e$, $5e$, $7e$, etc., et de même il est dans un accès de facile transmission lorsque l'épais-

seur de la lame qui le reçoit est dans les séries $2e$, $4e$, $6e$, etc.

Il existe un grand nombre de phénomènes analogues aux anneaux colorés : ainsi, certaines pierres (l'opale, etc.) qui contiennent des fissures remplies d'air ou de tout autre fluide, offrent des couleurs très-variées qui disparaissent par la pulvérisation du corps.

576. Newton a déduit de tous ces faits des conclusions importantes relativement à la coloration des corps. D'après lui, les particules de tous les corps, même de ceux que nous appelons opaques, sont réellement transparentes. Quant aux métaux qui paraîtraient faire exception, on peut les dissoudre par les acides et les rendre ainsi perméables à la lumière.

Les particules des corps sont séparées par des interstices remplis de divers fluides. Ces particules, ayant une épaisseur déterminée pour chaque corps, repoussent les rayons, qui, en les pénétrant, se trouvent dans un accès de facile réflexion; le corps prend ainsi la couleur des rayons simples ou mélangés qu'il a réfléchis; les autres rayons sont transmis ou absorbés.

On doit entendre par particules, de petits systèmes séparés les uns des autres, et composés chacun d'un certain nombre de molécules intégrantes.

La permanence de la couleur des corps s'explique bien par la grande densité de leurs particules, comparée à la densité des fluides environnans. Si au contraire la densité du corps est peu différente de celle du milieu environnant, la couleur varie avec l'inclinaison; c'est ce qui arrive pour les plumes de certains oiseaux.

L'opacité de certains corps tient d'abord à ce que ces corps absorbent et éteignent la lumière; ensuite à la multiplicité des réflexions qu'elle éprouve dans leur intérieur, à cause de la trop grande différence qui existe entre la densité de leurs particules et celle du fluide dont elles sont entourées. Une expérience appuie cette explication : qu'on remplisse un verre de morceaux de borax (substance transparente), la lumière ne passera que difficilement à travers la masse des petits fragmens de borax. Si l'on y verse de l'huile d'olive, dont la densité est peu différente de celle du borax, le mélange de borax et d'huile devient transparent. On doit donner la même explication de l'opacité des nuages.

577. L'explication des anneaux colorés dans le système des ondes, paraît plus naturelle. En effet, on sait que lorsqu'un faisceau de lumière SI tombe sur une lame transparente, il éprouve une réflexion partielle à la première surface; une autre à la seconde, et qu'enfin une troisième portion traverse la lame (*fig.* 378). Les deux rayons iC et $C'i'$, réfléchis l'un par la première surface, l'autre par la seconde surface, sont évidemment parallèles. Les intensités de ces deux lumières réfléchies sont peu différentes. Si les deux systèmes d'ondulations coïncident, il y aura augmentation de lumière; s'ils sont en retard d'un nombre impair de demi-oscillations, il y aura obscurité. Ne considérons, pour plus de simplicité, qu'une seule couleur élémentaire, par exemple la lumière violette. Le faisceau réfléchi à la seconde surface se trouve en retard d'une quantité proportionnelle au double de l'épaisseur qu'il a traversée deux fois.

e désignant l'épaisseur, $2e$ est le chemin parcouru par le rayon réfléchi à la seconde surface; si l est la lon-

gueur d'une ondulation dans l'air, il y a obscurité pour $2e = \frac{l}{2}$, c'est-à-dire pour une épaisseur $e = \frac{l}{4}$; de même pour $2e = \frac{3l}{2}$, ou $e = \frac{3l}{4}$, et ainsi de suite; de sorte que toutes les épaisseurs pour lesquelles il y aura obscurité, sont $\frac{l}{4}, \frac{3l}{4}, \frac{5l}{4}, \frac{7l}{4}$, et en général pour un multiple impair de $\frac{l}{2}$..... Il y aura lumière pour $2e = 2l$, ou $e = \frac{2l}{2}$; et ainsi de suite pour les épaisseurs $\frac{4l}{2}, \frac{6l}{2}, \frac{8l}{2}$, et en général pour un multiple pair de $\frac{l}{2}$..... Il résulte de ce qui précède, que les épaisseurs correspondantes à des anneaux lumineux, seront entre elles dans le rapport des nombres 0, 2, 4, 6, tandis que celles qui correspondent aux anneaux obscurs seront dans celui des nombres 1, 3, 5, 7. On trouve de la même manière l'explication des anneaux transmis; en effet, une portion qui tombe sur une lame transparente la traverse directement, une autre la traverse après deux réflexions dans son intérieur. Ces deux faisceaux sont parallèles; ils s'ajouteront ou se détruiront, suivant qu'il y aura concordance ou discordance entre les ondes qui les produisent. Il est clair que l'obscurité ne doit pas être complète, puisque les deux faisceaux n'ont pas des intensités tout-à-fait égales; ce qui est conforme à l'expérience.

578. Maintenant, si nous examinons les nombres donnés par la théorie pour les épaisseurs des lames, nous voyons qu'ils sont l'inverse de ceux que fournit l'expé-

rience. Ainsi, nous avons trouvé 1, 3, 5, 7, etc., pour les épaisseurs qui donnent des anneaux obscurs par réflexion, c'est le contraire de l'expérience, ces épaisseurs correspondent aux anneaux lumineux. De même 2, 4, 6, etc., d'après la théorie, correspondent aux anneaux éclairés; l'expérience montre que ce sont les épaisseurs des anneaux obscurs.

M. le docteur Young a levé cette difficulté ainsi qu'il suit. Dans la propagation d'une onde dans un milieu d'une densité uniforme, on peut assimiler l'ébranlement d'une tranche communiqué à la tranche suivante, au choc de deux billes de masses égales. Quand une bille élastique en mouvement choque une autre bille pareille en repos, elle lui communique son mouvement et prend l'état de repos. La même chose se passe entre deux lames d'éther; mais si la lumière passe de l'air dans le verre, on conçoit que la densité de l'éther peut être différente; alors les choses se passent comme entre des billes de masses inégales : de sorte qu'en suivant toujours la même comparaison, la tranche infiniment mince du premier milieu qui touche au second, et qu'on peut assimiler à la première bille en mouvement, ne reste pas en repos après avoir mis en mouvement la tranche contiguë du second milieu, à cause de la différence de leurs masses, et il y a réflexion; si elle est moins dense que la tranche qui la suit, elle prendra sur-le-champ un mouvement en arrière qui se communiquera aux couches précédentes, il y aura réflexion. Si elle est au contraire plus dense, elle conservera un mouvement en avant qui sera suivi d'un autre mouvement en arrière, en sorte que ce ne sera qu'au bout d'une demi-oscillation qu'elle agira sur les tranches précédentes, comme elle

agissait sur-le-champ dans l'autre cas, il y aura donc encore réflexion, mais les mêmes oscillations dans le rayon réfléchi auront lieu dans les deux cas à des époques différentes d'une demi-oscillation.

Ces considérations appliquées à la réflexion de la lumière, apprennent que selon qu'une onde lumineuse est réfléchie en dedans ou en dehors d'un milieu plus dense, il y aura une demi-oscillation de différence dans les deux rayons réfléchis. M. Poisson a été conduit depuis, par l'analyse, à la même conséquence.

Dans les anneaux colorés les deux systèmes d'ondes, qui produisent les phénomènes, ont été réfléchis, le premier en dedans du verre supérieur, et le second l'a été en dehors du verre inférieur; il y aura donc, d'après le principe précédent, une demi-oscillation de différence entre ces deux rayons. Il en résulte que des rayons qui s'accorderaient en raison de la différence des chemins parcourus indépendamment de cette considération, seront en opposition en y ayant égard. Conséquemment, partout où il devrait se produire de la lumière, il n'y aura que de l'obscurité, et réciproquement. Ce qui est conforme à l'observation transmise.

579. Par ce qui précède, on voit que le quart d'une ondulation lumineuse $\frac{l}{4} = e$ est précisément la longueur de ce que Newton appelle accès de molécules lumineuses. Ainsi, pour avoir les longeurs des ondulations des sept principales couleurs simples, il faudra multiplier par 4 les nombres qu'il a donnés pour leurs accès. On trouve de cette manière les mêmes valeurs qu'en déduisant les longueurs d'ondulation de la mesure des franges produites par deux miroirs

ou des phénomènes variés de la diffraction. Cette identité numérique, que M. Young a remarquée le premier, établit entre les anneaux colorés et la diffraction de la lumière, une relation intime qui avait échappé jusqu'alors aux physiciens guidés par le système de l'émission.

Puisque pour un anneau de même ordre formé avec une même lumière dans deux milieux de densité différente, les lames ont des épaisseurs qui sont entre elles dans le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction pour le passage de la lumière d'un milieu dans l'autre, n° 572, on conclut que les longueurs des ondulations qui donnent les mêmes couleurs pour ces deux milieux sont entre elles dans le même rapport.

Une circonstance très-digne d'être remarquée, c'est que, même avec de la lumière parfaitement homogène, on n'a pas de cercles sans épaisseur, mais des surfaces annulaires, parce qu'il n'y a jamais ni discordance complète, ni accord parfait.

De l'Héliostat.

580. Dans une infinité d'expériences d'optique, il est nécessaire de donner aux rayons lumineux une direction constante.

On y parvient en plaçant au volet de la chambre obscure dans laquelle on fait les expériences, un miroir plan dont on change l'inclinaison à chaque instant, puisque l'angle d'incidence du rayon solaire varie continuellement.

S'gravesande a imaginé une machine qu'il a nommée

Héliostat, et dont l'objet est de donner au miroir réflecteur un mouvement tel que le rayon solaire ait une direction constante. Les parties principales d'un héliostat sont un miroir et une horloge; l'aiguille du cadran fait mouvoir la queue du miroir. L'héliostat de S'gravesande a été perfectionné par différens physiciens, et particulièrement par Charles, par Malus, etc. La figure 379 représente un dessin de cet instrument. La théorie de l'héliostat est trop compliquée pour que nous la donnions ici (Voyez *Journal de l'Ecole polytechnique*, t. IX et X, où M. Hachette a décrit les différens héliostats).

Nous donnerons une idée d'un héliostat plus simple, imaginé par M. Gambey. Nous nous contenterons de faire connaître le principe sur lequel il repose.

Si l'on suppose la ligne *C D* être l'axe de rotation du mouvement apparent du soleil, la ligne *B C* la direction des rayons incidens de cet astre, et la ligne *G A* celle des rayons réfléchis; la ligne *B C* étant égale à la ligne *A C*, formera, avec la ligne *A B*, un triangle isocèle, de sorte qu'en plaçant un miroir parallèlement à cette dernière ligne, et perpendiculairement au plan du triangle *A B C*, ce miroir sera dans une position convenable pour réfléchir les rayons *B C* dans la direction *C A*, ce qui est la condition que doit remplir l'instrument. En voici la démonstration : (*fig.* 380.)

L'angle *C B A* est égal à l'angle *C A B*. Ces deux angles sont opposés et égaux, l'un à l'angle d'incidence et l'autre à l'angle de réflexion.

On voit maintenant que, si l'on fait tourner la ligne *C B* autour de la ligne *C D*, d'un mouvement égal à celui du

soleil, et si cette ligne *C B* forme avec la ligne *E F*, qui représente l'équateur, un angle égal à l'angle de la déclinaison du soleil, et que, d'ailleurs, la ligne *C D* soit parallèle à l'axe du monde, il est évident qu'à quelle qu'époque du jour que ce soit, la ligne *C B* sera la direction des rayons incidens, et la ligne *A B*, étant susceptible de tourner sur le point *A*, et de glisser sur le point *B*, sera toujours la base d'un triangle isocèle.

Ainsi, en employant un mouvement d'horlogerie de manière à faire tourner en vingt-quatre heures la ligne *C B* autour de la ligne *C D*, et en mettant sur la première de ces deux lignes un arc gradué pour placer cette ligne à la déclinaison du soleil, et un quart de cercle sur la ligne *C D*, pour placer cette dernière ligne à la hauteur du pôle, en même temps qu'on la dirige dans le méridien au moyen d'un viseur placé sur le pied de l'instrument; et si on ajoute à tout cela un miroir sur la ligne *A B*, comme il a déjà été dit, on aura une idée assez exacte de l'héliostat de M. Gambey.

Voyez le *Bulletin de la Société d'encouragement*, année 1826, pour une description que M. Hachette a donnée de ce dernier instrument.

ACOUSTIQUE.

581. L'acoustique est une partie de la physique, qui ne peut être exposée ici que d'une manière élémentaire. Pour être considérée dans toute son étendue, elle exigerait l'analyse la plus élevée; sous ce point de vue, elle ferait partie des sciences physico-mathématiques.

Le son est le résultat de certains mouvemens vibratoires produits dans les corps sonores; ces vibrations sont communiquées à l'air, et de l'air à l'oreille, de la manière qui sera ci-après expliquée. Dans ce trajet les sons les plus distincts ou les plus susceptibles d'êtres entendus, sont produits par les corps qui sont assez élastiques pour admettre dans leur nature un mouvement vibratoire; et plus les mouvemens sont rapides, plus le son qu'ils produiront sera aigu. Ainsi, une boule de terre glaise humide, qui est privée d'élasticité, ne produit d'autre son, quand on la frappe, que celui qui résulte de la condensation, de la petite portion d'air qui se trouve entre la boule et le marteau qui la frappe. Une boule de cuivre produira plus de bruit, parce que le métal dont elle est formée a plus d'élasticité.

Le bruit des armes à feu et du tonnerre, le sifflement d'un fouet, le claquement des mains, sont produits de la même manière, par des impulsions soudaines communiquées à l'air, et transmis à l'oreille par une succession de

vibrations; mais l'air ne peut être considéré comme le seul conducteur du son, puisque tous les corps élastiques le propagent aussi. Ainsi le plus léger frottement, fait avec une épingle sur le bout d'une longue pièce de bois de charpente, sera distinctement entendu en appliquant l'oreille à l'extrémité opposée. On croit généralement que le son se propage dans l'air par une succession de vibrations concentriques, semblables à celles qui se produisent sur la surface d'une pièce d'eau quand on y jette un caillou. Le corps sonore est le centre du mouvement, et les ondulations diminuent en force, à mesure qu'elles s'éloignent de ce centre, jusqu'à ce qu'elles deviennent trop faibles pour affecter le nerf auditif.

Pour vous former une idée des vibrations sonores, disposez une cloche de verre entre deux pointes de fer, et en la frottant à l'aide d'un archet ou en la choquant légèrement vous verrez les pointes successivement frappées par la cloche. On peut concevoir cette cloche comme formée d'une infinité d'anneaux séparés depuis sa base jusqu'au point culminant. Au moment où la cloche a été ébranlée par le frottement de l'archet, ou le choc qu'elle a éprouvé, chaque anneau prend une figure ovale; le grand axe de cet ovale est évidemment perpendiculaire au sens suivant lequel la percussion s'est faite. Le retour de l'anneau à sa première figure est suivi d'un nouveau mouvement, et ainsi de suite. Ces vibrations se communiquent à l'air jusqu'à ce qu'enfin la cloche reprenne l'état de repos.

582. On trouve de la manière suivante que le son est d'autant plus aigu que le nombre des vibrations, dans un temps donné, est plus grand. On fait d'abord vibrer une

lame d'acier très-mince et fixée par une de ses extrémités; pour cela, on l'écarte de sa position, elle y revient par une suite d'oscillations qu'on compte aisément, si la lame a assez de longueur. En diminuant ensuite la longueur, les vibrations deviendront assez rapides pour qu'on ne puisse plus les compter; mais la longueur de la lame vibrante étant connue, on en déduira le nombre des vibrations effectuées dans un temps donné. En effet, on démontre en mécanique que, pour une lame d'égale épaisseur dans toute sa longueur, la durée de chacune de ses vibrations est proportionnelle au carré de sa longueur. On trouve ainsi que, lorsqu'une lame commence à rendre un son appréciable, elle fait 32 vibrations par seconde. Le son qu'elle rend alors est le même que celui d'un tuyau d'orgue, de la longueur de 32 pieds, ouvert à son extrémité. La même expérience pourrait être faite avec une corde tendue par un poids connu; on verrait avec des expériences analogues que les sons cessent d'être appréciables quand le corps vibrant effectue 8,200 vibrations par seconde.

583. La transmission du son ne se fait pas dans le vide. On le démontre en plaçant un mouvement d'horlogerie sous le récipient d'une machine pneumatique; on le fait reposer sur un coussinet rempli de coton ou de laine; on fait le vide, et à l'aide d'une tige qu'on enfonce à volonté, on détermine le mouvement du rouage. On voit alors, sans rien entendre, le marteau frapper continuellement le timbre.

On rend encore l'expérience plus décisive en recouvrant la première cloche d'un cloche semblable, et en faisant le vide entre l'intervalle des deux cloches. Le plus lé-

ger son n'est pas entendu de l'observateur. Si on laisse rentrer peu à peu l'air, le son devient de plus en plus intense.

Il résulte des expériences de Priestley et de M. Pérolle, que l'intensité avec laquelle le son se transmet dans un gaz, est d'autant plus faible que la densité de ce gaz est moindre. Ainsi on entendrait à peine le son du timbre dans l'expérience précédente, si la cloche était remplie d'hydrogène.

Vitesse du son.

584. La vitesse du son est constante; le son des espaces proportionnels au temps. Cette vitesse a d'abord été évaluée à 1038 pieds par seconde.

L'incertitude de cette mesure engagea, en 1738, l'Académie des sciences à entreprendre de nouvelles expériences : elles furent faites entre Montlhéry et Montmartre.

On déterminait le temps qui s'écoulait entre le moment où l'on apercevait la lumière produite par l'explosion de la poudre, et celui où l'on entendait le bruit. En divisant l'espace parcouru par le temps observé, on avait la vitesse du son; car la lumière, vu l'immense rapidité de son mouvement, parcourt dans un temps inappréciable l'intervalle de 14,636 toises qui sépare Montmartre de Montlhéry. Plusieurs expériences ont été aussi faites sur des intervalles plus petits.

Il est résulté de ces expériences que la vitesse du son est constante, et qu'elle est de $337^{m},118$ par seconde; qu'un *son fort* et un *son faible* ont la même vitesse; qu'elle est sensiblement la même par un *temps pluvieux* que par

un *temps serein*. La direction et la force du vent ont une influence sur la vitesse du son; si cette direction concourt avec la direction de la propagation du son, elle l'augmente; si elle lui est opposée, elle l'affaiblit; enfin, dans le cas où elle lui est perpendiculaire, la vitesse du son n'en est nullement altérée.

Des expériences faites à Gottingue par le major Müller, donnent une vitesse un peu plus forte.

Une commission (1) prise dans le sein de l'Académie des sciences, a déterminé de nouveau la vitesse du son dans la nuit du 21 juin 1822 entre Villejuif et Montlhéry. La température de l'atmosphère était de 16 degrés. Pour que les résultats ne fussent pas influencés par le vent, les coups de canon des deux stations opposées étaient réciproques; le nombre trouvé $337^{m},2$, diffère peu de celui qu'avaient obtenu les académiciens en 1738. *Voyez* pour les détails, le rapport de M. Arago (*Ann. ch. et phys.*, t. 20) (2).

585. La connaissance de la vitesse du son fournit un moyen d'estimer d'une manière suffisamment approchée, la distance à laquelle on se trouve d'une ville assiégée, d'un fort,

---

(1) Les observateurs de Villejuif étaient MM. Humboldt, Gay-Lussac et Bouvard. Ceux de Montlhéry étaient MM. Prony, Arago et Mathieu.

(2) Don Josef de Espinosa et don Felipe de Bauza ont trouvé à Sant-Yago, au Chily, 374^{m} à la température de $23^{\circ},2$. L'expression de la vitesse du son montre bien que cette vitesse doit augmenter avec la température. Aussi déjà Bianconi avait trouvé une plus grande vitesse en été qu'en hiver; mais la différence est-elle aussi forte que semblent l'indiquer les observations des physiciens espagnols? C'est ce qui sera décidé par les observations ultérieures.

etc. Il suffit de compter le nombre de secondes et de fractions de secondes, qui s'écoulent depuis l'instant où l'on aperçoit la lumière d'un canon et celui où le bruit arrive à l'oreille.

572. Il est intéressant de comparer la vitesse calculée à la vitesse observée. L'expression qui représente la vitesse du son est $\sqrt{\frac{gH}{d}}$.

H étant l'élasticité ou la pression de l'air, d la densité du même fluide, et g la gravité, il faut mettre dans cette formule les valeurs des lettres g, d et H.

Si l'on prend la densité de l'air à la pression moyenne $0^m,76$ et à la température de la glace fondante, et g sous la latitude de Paris, on aura $H = 0^m,76$; $d = \frac{1}{10463}$ de la densité du mercure, et $g = 9^m,809$, ce qui conduit à $279^m,28$ pour la vitesse du son à zéro.

Pour la comparer à l'expérience des académiciens (en 1822), dans laquelle le baromètre marquait $0^m,756$ et le thermomètre 16°, on fera

$d = \frac{1}{10463 \times (1+0,00375 \times 16)}$, et $H = 0,6^m,78$. Conséquemment

$$V = \sqrt{9,809 \times 0,756 \times 10463 \times (1 + 0,00375 \times 16)}$$

$= 286^m,78$.

Ce qui diffère de la vitesse observée de $50^m,42$.

Cette différence entre des expériences précises et une théorie mathématique fondée sur les lois de la mécanique, a beaucoup exercé la sagacité des géomètres. M. Delaplace a pensé que la cause principale de cette discordance doit être attribuée à la chaleur dégagée dans l'air par la

compression; et a été conduit à l'énoncé suivant : « La vitesse réelle du son est égale au produit de la vitesse que donne la formule newtonienne, par la racine carrée du rapport de la chaleur spécifique de l'air soumis à la pression constante de l'atmosphère à diverses températures, à la chaleur spécifique lorsque son volume reste constant. »

D'après le Mémoire de MM. Laroche et Bérard, $\sqrt{\frac{C'}{C}} = \sqrt{\frac{3}{2}}$. Des expériences de MM. Gay-Lussac et Velter, $\sqrt{\frac{C'}{C}} = \sqrt{1,375}$. En multipliant la vitesse calculée par ce dernier nombre, le produit ne diffère que de quelques mètres de la vitesse observée. (*An. ch. et ph.*, t. 20, p. 266.)

Il n'est pas possible de montrer directement le dégagement de chaleur dans la propagation du son. Mais ce qui rend le dégagement très-probable, c'est que la vitesse calculée dans cette hypothèse par M. de Laplace d'une part, et par M. Poisson de l'autre, s'accorde assez bien avec la vitesse observée.

Les expériences de M. Biot sur la transmission du son à travers les vapeurs, indiquent aussi un dégagement de chaleur. Sans ce dégagement de chaleur, le son ne se transmettrait pas dans les vapeurs, parce que la vapeur se liquéfierait par la compression, et le son ne serait pas transmis; mais si la température s'élève comme dans l'air, alors l'espace peut admettre de la vapeur plus condensée, et la transmission du son pourra en même temps avoir lieu, conséquence tout-à-fait conforme à l'expérience. (*Société d'Arcueil*, t. 2.)

586. La forme $\sqrt{\frac{gH}{d}}$ du radical montre que sa valeur est indépendante de la pression, puisque, d'après la loi de la compression des gaz, $\frac{H}{d}$ est une quantité constante (n° 108); d'où l'on voit que la vitesse du son doit être la même à toutes les hauteurs de l'atmosphère qu'au niveau de la mer, la température étant supposée constante. Il est clair d'après cela, qu'il faut distinguer l'intensité du son de sa vitesse; car il est naturel de penser que l'intensité du son qui n'est autre chose que la force avec laquelle les particules aériennes frappent l'organe de l'ouïe, doit dépendre de la densité et de la vitesse de ces particules. Cette intensité doit donc s'affaiblir d'autant plus vite, toutes choses égales d'ailleurs, que la couche d'air où le premier ébranlement s'excite, a moins de densité, c'est ce qui est conforme à l'expérience du n° 569 et aux observations de Saussure sur les régions des Alpes, où le bruit d'un coup de pistolet ne se faisait entendre qu'à une faible distance.

La valeur que nous venons de donner pour la densité est relative à l'air parfaitement sec, cas qui n'a jamais lieu dans la nature; mais, comme l'atmosphère ne contient, même dans les temps les plus chauds, qu'une quantité très-faible de vapeur, et que, d'un autre côté, la vapeur pèse seulement les $\frac{5}{8}$ de l'air, sous le même volume, il en résulte que l'influence de cette vapeur est très-légère.

587. La transmission du son est beaucoup plus rapide dans les substances solides et liquides, que dans les gaz (1).

(1) Remarque qui avait déjà été faite par Descartes.

On constate cette différence en se plaçant à l'extrémité d'une longue file de tuyaux de fonte, ou d'un mur de pierre. On entend distinctement les coups de marteaux frappés à l'autre extrémité; et si l'on fait attention, on percevra d'abord le son transmis par la matière solide, et ensuite le son transmis par l'air. Il résulte des calculs de M. de Laplace que la vitesse de transmission étant 1 dans l'air, elle devient $4\frac{1}{2}$ dans l'eau pure; $4\frac{7}{10}$ dans l'eau de mer; $10\frac{1}{2}$ dans le laiton. Tout cela est d'accord avec les expériences de Chladni, d'Hassen Fratz, de M. Biot, etc.

La vitesse du son dans un liquide est $\sqrt{\frac{g}{c}}$. g étant égal à $9^m,808$, nombre exprimant le double de l'espace que la pesanteur fait parcourir aux corps dans une seconde sexagesimale, et c étant la diminution de volume que subit le liquide par la compression d'un mètre du même liquide. M. de Laplace prend le nombre 42,5 millionièmes, donné par Kanton pour la diminution de volume que subit l'eau pure, soumise à une pression de $0^m,76$ de mercure ou $10^m,325$ d'eau. Or 0,0000425, divisé par $10^m,325$, devient 0,00000421; c'est la diminution produite par 1^m de pression d'eau. La vitesse du son dans l'eau pure est donc égale à $\sqrt{\frac{9^m,8088}{0,00000421}} = 1525^m,8$, nombre quatre fois et demi plus grand que $337^m,2$, vitesse du son dans l'air.

Nous remarquerons que la valeur de la compression donnée par Kanton est au-dessous de la vérité. De plus, en suppposant que l'expérience de ce physicien fût exacte, elle n'indiquerait toujours que la compression apparente,

tandis qu'il faudrait avoir la compression absolue. Il est étonnant que M. de Laplace n'ait pas fait cette dernière remarque.

Nous ajouterons une autre observation. La différence entre la vitesse du son observée et la vitesse calculée, est attribuée à l'accroissement d'élasticité qu'acquiert l'air par suite de son élévation de température. Cette explication est fondée sur la grande compressibilité de l'air. Et même, si des expériences directes ne pouvaient pas rendre manifeste le dégagement de chaleur dans la compression des gaz, ce dégagement serait une conséquence de la supériorité de la vitesse du son observée sur la vitesse du son calculée; mais peut-on étendre cette manière de raisonner aux corps liquides et solides? peut-on, par exemple, conclure que l'eau ne s'échauffe pas dans sa compression, de ce que la vitesse du son observée dans ce liquide ne diffère pas sensiblement de la vitesse calculée? Nous ne le pensons pas, et même nous oserons dire que de semblables comparaisons ne sont nullement propres à conduire à aucune conséquence rigoureuse, pour plusieurs raisons; d'abord, parce que la compression produite dans la propagation est très-faible, comparativement à celle qui est nécessaire pour échauffer l'eau d'une manière sensible; ensuite, parce que la valeur absolue de la diminution de volume de l'eau dans la compression est accompagnée d'incertitude; enfin, parce qu'il est très-difficile d'opérer sur une eau tout-à-fait identique avec celle du lac ou de la mer à travers laquelle le son se propage. Oserons-nous dire que le seul moyen qui nous paraisse propre à reconnaître le dégagement de chaleur dans la compression des liquides, est

celui que nous avons présenté à l'Académie, et qui consiste, 1° à laisser un corps liquide, soumis à une compression déterminée, prendre une température connue; 2° à mesurer l'abaissement de température au moment où on le ramène à la pression ordinaire. Ce procédé a surtout, selon nous, le grand avantage de pouvoir conduire à des résultats très-peu différens de la vérité, tandis que par tous les autres procédés, on s'expose à avoir un résultat beaucoup trop fort ou beaucoup trop faible.

588. Il y a deux espèces de son, le bruit et le son musical. Le bruit est un choc instantané, communiqué aux particules de l'air; le son musical, au contraire, consiste dans une série de vibrations isochrones qui viennent frapper l'oreille. Il faut distinguer trois qualités dans le son musical; 1° *l'intensité* qui dépend de l'amplitude des vibrations, comme on peut le voir en passant un archet sur une corde avec plus ou moins de rapidité; 2° *le ton* : c'est cette qualité qui fait qu'un son est plus ou moins grave, et qui dépend du nombre de vibrations exécutées dans un temps donné; la différence entre un son *grave* et un son *aigu* consiste en ce que le corps qui produit le premier fait un moindre nombre de vibrations que celui qui rend le second; 3° *le timbre*, qualité que donne chaque instrument au son qu'il fait entendre. Ainsi il existe une différence appréciable entre la même note exécutée sur le hautbois ou sur la flûte.

Propagation du son.

589. Soit une colonne d'air d'une densité uniforme,

renfermée dans un cylindre; supposons une lame élastique, placée à l'orifice, perpendiculairement à l'axe du cylindre. Supposons qu'on mette cette lame en vibration; elle agira sur la tranche d'air qu'elle touche immédiatement; elle la poussera, la comprimera, et, dans son retour, laissera un vide où l'air pourra se dilater. Voilà pourquoi les particules d'air contiguës à la lame vibrante reviendront tour-à-tour comme elle. Par ces vibrations partielles, elles agiteront donc les molécules d'air qui les avoisinent. Celles-ci agiront sur les suivantes, et ainsi de suite. Ces effets se répéteront pendant tout le temps que dureront les vibrations de la lame.

Il est visible que chaque ondulation sera alternativement condensée et dilatée. De sorte que, si la densité de la colonne d'air ébranlée devient d'abord D et $D + \frac{D}{m}$, elle deviendra ensuite $D - \frac{D}{m}$ et D. Toutes les particules d'air successivement ébranlées éprouveront ces divers états.

L'onde sonore est l'ensemble des ondulations communiquées aux couches d'air. La *longueur* d'une ondulation est l'étendue de l'excursion de chaque couche. Elle est sensiblement égale à l'espace que le son parcourt pendant la durée de l'excursion du corps vibrant, par lequel le son est produit. Si le corps fait une vibration par seconde, l'ondulation aura une longueur de $337^m,2$ qui est l'espace parcouru par le son pendant une seconde de temps. Si la durée de l'excursion du corps vibrant variait, la longueur de l'ondulation varierait proportionnellement. Le corps, tendant à revenir vers sa position primitive, choquera

l'air avec une force qui s'affaiblira de plus en plus, et qui finira par être nulle.

Le son dans un tuyau cylindrique ne doit pas éprouver d'affaiblissement, puisque la couche d'air ébranlée conserve la même étendue. C'est, en effet, ce qui est conforme à l'expérience. Ainsi une personne parlant à voix basse près de l'ouverture d'un tuyau cylindrique, se fait entendre distinctement par une seconde personne, placée à une distance considérable, près de l'autre extrémité.

Si l'on conçoit une couche d'air indéfinie dans tous les sens, et l'ébranlement communiqué à un seul point, tout l'air ne sera pas ébranlé à la fois; la couche d'air placée à l'origine du mouvement sera d'abord ébranlée; après sa vibration, son mouvement se communique à la tranche suivante, et ainsi de suite. Toutes les molécules d'air ébranlées à chaque instant se trouveront sur une surface sphérique dont le rayon ira sans cesse en augmentant, jusqu'à ce qu'enfin l'air ne soit plus ébranlé. Il est visible que l'intensité de son décroît en raison inverse du carré de la distance au centre d'ébranlement. L'onde sonore et la longueur d'une ondulation sont ici comme dans le cas précédent.

Soit maintenant un ébranlement instantané, produit dans un espace fini; chaque partie ébranlée ne produira dans les endroits voisins que ce qu'a produit le point unique considéré plus haut; mais à une certaine distance du centre d'ébranlement, tous les effets isolés se combineront de manière à produire dans chaque tranche une série d'ébranlemens tels que l'effet total sera égal à celui qui résulterait de la somme des ébranlemens partiels. Seulement

il faut regarder comme positifs les mouvemens qui tendent à éloigner les particules du centre de l'ébranlement, et comme négatifs ceux qui tendent à les rapprocher. Cette co-existence des petits mouvemens est un principe extrêmement fécond : il permet de concevoir pourquoi les sons qui se produisent à la fois dans une salle se propagent séparément sans se confondre, et arrivent nets et distincts à l'organe de l'ouïe.

Réflexion du son.

590. Le son est susceptible de se réfléchir à la manière de la lumière et de la chaleur, en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Quand une onde sonore rencontre un obstacle, elle est réfléchie, en suivant la loi énoncée.

Dans les espaces clos, le son est ainsi renvoyé d'un mur à l'autre. Dans ce cas, les intervalles entre le son direct et le son réfléchi sont inappréciables. Mais si l'on se trouve à l'air libre, à une certaine distance de l'obstacle, il s'écoulera un temps sensible entre le son direct et le son réfléchi. S'il arrive qu'il y ait plusieurs obstacles, il se produira autant d'échos. On cite des échos qui répétaient le même son jusqu'à quarante fois.

Tout le monde a entendu parler des échos formés par des voûtes ellyptiques; deux personnes placées aux foyers peuvent s'entendre, même en parlant à voix basse.

On a expliqué le roulement du tonnerre par la réflexion du son. On considère ce roulement comme étant le résultat du premier bruit réfléchi successivement par les di-

verses couches de l'atmosphère, dont les densités sont, comme on sait, différentes (n° 250) (1).

C'est sur la réflexion du son que sont fondés les porte-voix, les cornets acoustiques, les cabinets parlans, etc.

Lois des vibrations des corps sonores.

591. Ce qui précède a fait voir qu'il existe une dépendance entre la rapidité des vibrations d'une corde tendue, et la nature du son qu'elle rend.

Nous allons maintenant reprendre ce sujet et comparer les sons entre eux.

Une corde rendue rectiligne par une tension et écartée de sa position par une cause quelconque, y revient par une suite d'oscillations. Voici la relation que le calcul donne pour une corde tendue par un poids, $t = \sqrt{\frac{l\,p}{g\,P}}$; t est le temps d'une oscillation très-petite, l la longueur de la corde, p son poids, g la gravité, et P le poids attaché à une des extrémités de la corde, et qui la maintient dans un état de tension; si à la place de p on met sa valeur $l\,\pi\,r^2\,d$ (d étant la densité), on aura $t = r\,l\sqrt{\frac{\pi\,d}{g\,P}}$, ou si n est le nombre des vibrations faites pendant l'unité de temps, on aura $n = \frac{1}{r\,l}\sqrt{\frac{g\,P}{\pi\,d}}$.

(1) Dans les expériences que fit la commission de l'Académie en 1822, les coups de canon tirés à Montlhéry étaient accompagnés d'un roulement qui durait jusqu'à 25″. Mais on remarque qu'il n'eut jamais lieu qu'au moment de l'apparition de quelques nuages, et que par un ciel serein le bruit était unique. (*Ann. ch. et phys.*, t. 20, p. 222.)

De cette formule résultent plusieurs conséquences remarquables.

1°. Les nombres de vibrations de deux cordes de même matière, de même diamètre et également tendues, sont *en raison inverse des longueurs.*

2°. Si la matière, le diamètre et la longueur sont les mêmes et que la tension soit différente, les nombres d'oscillations sont proportionnels *aux racines carrées* des poids qui tendent les cordes.

Ces conséquences se vérifient à l'aide du *Monocorde* (*fig.* 381), appareil consistant en une corde fixée par son extrémité *A* et tendue par un poids à son autre extrémité; afin qu'une portion du poids ne soit pas employée à vaincre le frottement, on fait reposer la corde sur une poulie mobile *B*.

Pour que les expériences aient plus de précision, on se sert toujours de la même corde. Veut-on lui donner diverses longueurs, on emploie un petit chevalet mobile de forme triangulaire, qu'on place à tel point de la longueur qu'on veut (*fig.* 382). Le chevalet désigné par *F* a une hauteur telle qu'étant placé entre le plateau du monocorde et la corde elle-même, celle-ci presse dessus, et se trouve ainsi fixée en ce point.

Si le chevalet est placé au milieu de la corde, alors le nombre de vibrations faites par chaque moitié, sera double dans un temps donné, de celui que fait la corde entière, et le son rendu par chaque moitié sera ce qu'on appelle l'*octave* aiguë du son de la corde entière.

Si l'on place le chevalet au tiers de la corde, le son rendu par cette portion sera plus aigu encore que le précédent, et sera l'octave du son rendu par l'autre portion

qui fait les $\frac{2}{3}$ de la corde. Ce dernier sera ce qu'on appelle en musique la *quinte* du son produit par la corde entière; en continuant de la même manière, on formerait les consonnances suivantes :

L'octave aiguë sera deux, le son le plus bas étant l'unité, c'est l'intervalle entre les deux *ut* de la gamme ordinaire;

L'intervalle de *ut* à *sol* ou la quinte, en montant, aura pour expression $\frac{3}{2}$;

L'intervalle de *ut* à *fa* ou la quarte sera représenté par $\frac{4}{3}$;

L'intervalle de *ut* à *mi* ou la tierce majeure le sera par $\frac{5}{4}$;

L'intervalle de *mi* à *sol* ou la tierce mineure le sera par $\frac{6}{5}$.

En continuant de la même manière, on trouverait tous les sons musicaux représentés ainsi qu'il suit :

Sons	*ut*,	*re*,	*mi*,	*fa*,	*sol*,	*la*,	*si*,	*ut*.
Nombres des vibrations	1	$\frac{9}{7}$,	$\frac{5}{4}$,	$\frac{4}{3}$,	$\frac{3}{2}$,	$\frac{5}{3}$,	$\frac{15}{8}$,	2.

Ces huit sons forment la gamme naturelle.

On vérifie la conséquence relative aux poids de la manière suivante : si cette conséquence est fondée, une corde tendue, par un poids quadruple, doit donner le même son que la même corde réduite à moitié, ce qui est en effet conforme à l'expérience.

Expériences de Sauveur.

592. Si l'on fait vibrer une seule corde, elle produit en même temps plusieurs sons; on en entend en général trois; mais une oreille attentive peut en distinguer jusqu'à cinq. Supposons que le son fondamental soit représenté par l'unité, les deux sons concomitans seront représentés, l'un

par trois et l'autre par cinq, de sorte que le premier étant *ut*, le second sera l'octave de la quinte *sol* en montant, et le troisième la double octave de la tierce majeure *mi*. Avec de l'attention et de l'habitude on distingue deux autres sons. Le premier est représenté par deux et le second par quatre. Ils sont donc l'octave et la double octave du son principal.

Il résulte de là qu'une corde rend à la fois les sons représentés par les nombres 1, 2, 3, 4 et 5.

Il paraîtrait que ce ne sont là que les premiers termes d'une série infinie; car si l'on dispose à côté de la corde, mise en vibration, plusieurs autres cordes de même diamètre et d'égale tension, mais dont les longueurs soient, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$, etc., de la première, elles vibrent toutes en même temps. Nous ajouterons encore que dans certaines circonstances on apprécie jusqu'à sept sons rendus par une même corde.

On a donné le nom de son générateur au son principal, et les sons qui l'accompagnent ont été appelés sons *harmoniques*.

Parmi les différentes hypothèses proposées pour les sons harmoniques, la suivante paraît la plus satisfaisante. Elle consiste à supposer qu'en même temps que la corde entière vibre autour de sa position d'équilibre, chacune de ses parties vibre aussi, sans que les différentes vibrations partielles se nuisent mutuellement. On conçoit en effet la possibilité que ce système exécute toutes les vibrations à la fois. Une autre expérience de Sauveur semble venir à l'appui de cette explication.

Si l'on place un chevalet en un point d'une corde tel que les parties résultantes aient un rapport simple avec la

corde entière, et que le chevalet n'appuie pas assez fort pour intercepter toute communication entre les deux parties de la corde; si on fait vibrer chaque partie séparément, elles rendront le même son qui sera différent de celui de la corde entière, et ce son sera tel, que, si l'on représente le rapport entre les deux parties par les nombres les plus simples, le son qu'elles feront entendre aura l'unité pour expression. Ainsi, si le chevalet est placé au quart de la corde, la plus grande partie en sera les $\frac{3}{4}$; cette partie, pour rendre le même son que la plus petite, se divisera en trois portions égales chacune à la plus petite. En effet, si l'on dispose d'avance à chaque tiers de la grande partie un morceau de papier, il restera en repos malgré la vibration de la corde, ce qui prouve l'existence des *nœuds* en ces points. Si, au contraire, on place le papier dans un point différent, il sera renversé dès le premier moment de la vibration.

Expérience de Tartini.

593. Cette expérience consiste à faire entendre à la fois deux sons forts et soutenus. De leur concours résulte un troisième son plus faible, et ce qu'il y a de remarquable, c'est que si l'on représente le rapport entre les deux premiers sons par les nombres les plus simples, le son produit sera représenté par 2.

Vibrations des verges solides, droites ou courbes.

594. Les vibrations d'une verge solide, droite, par exemple d'une verge d'acier, peuvent avoir lieu, comme dans les cordes, transversalement et longitudinalement; mais

les lois de leurs vibrations transversales sont différentes de celles auxquelles les cordes sont soumises, et cela parce que dans les cordes la tension n'agit que dans un sens, tandis que dans les verges solides, et en général dans les surfaces rigides, la force de ressort agit sur la courbure même.

Dans le mouvement longitudinal, au contraire, la réaction élastique des particules matérielles agit de même dans les cordes et dans les tiges (les unes et les autres étant supposées minces).

La rigidité seule d'une verge solide suffit pour la tenir tendue. Il n'est donc pas nécessaire qu'elle soit fixée à ses deux extrémités, comme une corde, pour être mise en vibration. Elle peut être fixée d'une infinité de manières, et donner ainsi lieu à diverses sortes de mouvemens.

Dans les expériences sur la vibration des verges, il faut avoir soin d'en choisir qui soient bien droites, homogènes et uniformément épaisses. Supposons qu'on veuille fixer un des bouts d'une verge solide, on la serre dans un étau; on la met en vibration à l'aide d'un archet. Pour produire des nœuds analogues à ceux que présentent les cordes, on touche, avec le doigt ou avec un corps solide, un des points qu'on veut réduire à l'immobilité. Dans les verges planes, on rend sensibles à l'œil les subdivisions spontanées qu'elles éprouvent dans leurs vibrations; il suffit de les couvrir de sable fin (1). Tous les grains, agités par le mouvement vibratoire, se rassemblent dans les

(1) Ce moyen ingénieux a été imaginé par Galilée; il a servi à Chladni dans ses nombreuses et belles expériences.

nœuds; on observe les mêmes effets sur les verges cylindriques, en y enfilant de petits anneaux de papier.

Voici les résultats principaux :

1°. Pour des verges de même matière, différentes par leur épaisseur et leur longueur, le nombre des vibrations est proportionnel aux épaisseurs des lames et réciproque aux carrés de leurs longueurs. Il résulte de là que, pour des lames de même longueur, celles qui ont le plus d'épaisseur rendent les sons les plus aigus.

2°. Pour des verges de même matière et de figures semblables, dont les épaisseurs sont dans le même rapport que les longueurs, les nombres des vibrations sont en raison inverse des racines cubiques des poids.

3°. La largeur n'a aucune influence sur les sons rendus par les lames mises en vibration transversalement.

595. Les verges droites peuvent vibrer aussi dans le sens de leur longueur. Le moyen qui réussit le mieux, consiste à les serrer en les enveloppant d'un morceau de drap mouillé, et à les frotter ainsi dans le sens de leur longueur. Il faut qu'on les soutienne par un autre point; ce point devient un nœud de vibration. Les subdivisions des verges, en parties aliquotes, s'obtiennent de même que dans les expériences sur les vibrations transversales. Les nombres des vibrations longitudinales sont réciproquement proportionnels aux longueurs des verges, et l'acuité des sons, pour des longueurs égales, est excessivement plus grande que celle des sons rendus par des vibrations transversales; c'est pourquoi il faut employer des verges très-longues pour pouvoir apprécier les sons.

La série des sons successifs est la même pour les cordes

et pour les verges rigides, lorsque les unes et les autres exécutent des vibrations longitudinales.

Deux verges ou cordes bien cylindriques, de même longueur, mais d'inégale épaisseur, donnent les mêmes sons.

596. M. Savart a remarqué que les lignes nodales ne sont nullement correspondantes sur les deux surfaces d'une même lame. Ainsi qu'on tienne entre les doigts une lame par son milieu, et qu'on la frappe à l'un quelconque de ses bouts; si l'on a répandu d'avance du sable sur la surface, la formation des nœuds sera rendue sensible par la disposition du sable. Maintenant, si l'on retourne la lame de manière que la face inférieure devienne supérieure et réciproquement, et qu'on recommence l'expérience de la même manière, la distribution des lignes nodales sera toute autre qu'elle n'était sur la première surface; celles d'une surface correspondront aux milieux des parties vibrantes de l'autre. On obtiendra ce résultat avec des lames de 2 à 4 millimètres, formées avec une substance solide quelconque. Les subdivisions varient selon le point touché pour la soutenir entre les doigts.

Dans chaque cas on n'entend qu'un son appréciable, correspondant à la division principale établie par le point de contact; mais la multiplicité des lignes nodales indique qu'il s'en produit en même temps d'autres. Le même physicien, en soumettant à ses expériences des lames assez épaisses et assez larges pour qu'il pût étudier la configuration des lignes nodales sur toutes leurs faces, a reconnu que ces lignes forment des spires continues, et que, pour un même son, le sens de ces spires et leur

intervalle est constant. Dans ces expériences, M. Savart attache à la lame une tige mince de verre, dont la friction sert d'excitateur (*fig.* 383).

597. M. Chladni, guidé par l'analogie qui existe entre les sons rendus par les verges cylindriques rigides avec ceux que produisent des colonnes cylindriques d'air contenues dans les tuyaux des instrumens à vent, a pu conclure, d'après les sons des premières, la vitesse du son dans leur intérieur. Les résultats de M. Chladni sont tout à-fait conformes à ceux que M. de Laplace a tirés de la théorie. (*Voy.* Vitesse de son.)

598. Il résulte aussi des observations de M. Chladni, que les verges droites sont susceptibles d'un autre mode de vibrations qu'il a appelées *tournantes*. On détermine ces vibrations en imprimant à des tiges rigides une torsion plus ou moins forte. (*Voy.* l'acoustique de M. Chladni, pag. 110.)

On conçoit que la forme des verges doit avoir une influence sur la nature des mouvemens dont elles sont susceptibles, et par suite sur les sons qu'elles font entendre.

599. Le diapason est formé par deux branches courbes, un peu plus écartées à la base qu'à leurs extrémités (*fig.* 384) à l'aide d'un cylindre qu'on introduit dans la partie la plus large *AB*, et qu'on force ensuite à passer entre les extrémités plus rapprochées *C* et *D*. On met en vibration les deux tiges *AC* et *BD*; elles produisent toujours le même son, quand elles sont ébranlées de la même manière. Ce son sert de type invariable pour régler le ton d'un instrument quelconque. Un diapason ainsi construit ne fournit qu'une seule note; mais on peut en avoir douze gradués

de manière à donner les douze demi-tons dont se compose une octave entière.

Des surfaces vibrantes.

600. Les vibrations excitées dans les lames élastiques, à l'aide d'un archet qu'on passe avec frottement sur leurs bords, produisent des effets très-curieux et très-variés.

Dans les surfaces vibrantes, les limites entre les ondulations sont marquées par des lignes de repos qu'on a nommées *lignes nodales*.

Un sable fin ou toute autre poussière qu'on répand uniformément sur la lame vibrante, va se rassembler dans les endroits en repos, et produit ainsi des figures plus ou moins composées, mais qui souvent présentent une symétrie parfaite. En général, quand un système rigide, de forme quelconque, exécute des vibrations, soit longitudinales, soit transversales, ce système se partage en un certain nombre de parties qui exécutent leurs vibrations séparément.

C'est particulièrement à la sagacité et à la constance de M. Chladni que la physique doit la découverte de tous ces faits aussi neufs qu'intéressans. Voyez son *Acoustique*.

Nous ne rapporterons ici que les cas les plus simples. Nous supposerons que les lames soumises aux expériences soient en verre, que leur densité soit uniforme, et que leurs faces soient bien planes et parallèles; il faut leur donner un point d'appui qui leur permettre de résister. On les tient ordinairement entre les doigts, et on les frotte sur leurs bords avec un archet. Il est clair que ces bords sont préalablement adoucis et usés à l'émeri.

La figure 385 est celle qui donne le son le plus grave dans les plaques carrées de métal, de verre ou d'une substance homogène. Pour l'obtenir on serre la lame au centre, et on applique l'archet à l'un des angles.

Si, tenant toujours la lame par le centre, on applique l'archet au milieu d'un des côtés, on obtient la figure 386. Alors les lignes nodales passent par les diagonales; le son produit est le plus grave après le précédent; ce son est la quinte aiguë du premier. En variant les formes des plaques et les points d'application de l'archet, on donne naissance à une multitude de figures dont quelques-unes sont représentées (*fig.* 387).

Dans les plaques dont l'élasticité n'est pas la même dans tous les sens, le mode de vibration est changé. Par exemple, dans des plaques de bois dont le plan est parallèle à la direction des fibres, les vibrations présentent des particularités qui tiennent à ce que la réaction élastique des lames est plus grande dans le sens de leurs fibres que dans tout autre sens.

Il résulte des recherches de M. Savart, qu'on peut aussi tirer des sons des membranes tendues; pour cela, il suffit de faire vibrer près de la membrane tendue une plaque solide qui ne la touche par aucun point : les vibrations de la plaque solide se communiquent par le moyen de l'air à la membrane. Cette communication de mouvement est au reste analogue à ce que nous avons rapporté relativement aux vibrations excitées dans plusieurs cordes par le moyen d'une seule corde en vibration. (Expériences de Sauveur.)

On a aussi étudié les vibrations des corps de forme plus composée, et en particulier des vases dont les surfaces

extérieures et intérieures font révolution autour d'un même axe. C'est ce dernier genre de vase qui est employé dans les cloches et dans l'harmonica. L'instrument appelé *harmonica* est formé d'un certain nombre de vases de verre inégaux en grandeur, mais semblables par leur forme. On met ces vases en vibration, soit à l'aide d'un archet, soit en les frottant avec le doigt mouillé.

Instrumens à vent.

601. Les instrumens à vent sont généralement composés de tuyaux, dont la forme est variable et dans lesquels l'air est mis en vibration suivant le sens de leur longueur par divers moyens.

C'est bien ici l'air qui est le corps sonore, puisque, quelles que soient la matière, l'épaisseur des parois des tuyaux, le son est toujours le même.

Il n'y aura point de son si l'on souffle simplement dans un tube, car on ne produit ainsi qu'un mouvement dans la colonne d'air qu'il renferme; il faut y exciter en un de ses points une succession rapide de condensations et de dilatations alternatives; ces mouvemens alternatifs transmis à la colonne d'air, y excitent des ondes sonores.

Le moyen de déterminer de semblables ondes est de faire entrer l'air par une fente étroite, de manière qu'il vienne se briser contre ses bords; c'est ainsi qu'on siffle dans une clef forée. Un sifflet est en général un tuyau cylindrique taillé en biseau près de son orifice; l'air qu'on souffle dans le tuyau vient frapper le tranchant du biseau, et produit le son. Les tuyaux d'orgues, appelés tuyaux à bouche ou à flûte, sont disposés de la même manière; ces

tuyaux sont représentés dans la *fig.* 388. A une certaine distance de l'extrémité *D D*, est une ouverture latérale *B* qu'on appelle la *bouche*, parce que c'est elle qui fait parler le tuyau. La partie *B C* qui est au-dessus de cette ouverture, est appellée la *lèvre supérieure*.

Elle est aplatie et rentrée en dedans. C'est contre cette partie de la paroi que vient se briser la lame d'air qui met la colonne en vibration. A cet effet, on joint au tuyau un cône *e f g* qu'on appelle le *pied*, parce qu'il sert de pied au tuyau quand il est en place. C'est par une ouverture *g* pratiquée à la pointe du cône qu'entre le vent des soufflets, il est fermé à sa base par une lame métallique *e h k*, dans laquelle on pratique une ouverture *h h'*, que l'on nomme la *lumière*. La partie *A B* de la paroi du tuyau conique qui est au-dessous de la lumière, et qu'on nomme la *lèvre inférieure* du tuyau, est aplatie comme la lèvre supérieure, et elle rentre comme elle en dedans, en formant avec l'axe commun des tuyaux un angle de 22 degrés et demi. Ce système étant ainsi disposé, on souffle de l'air par le sommet du cône, ce fluide s'échappe par la lumière *h h'*, en formant une lame mince qui se brise contre la lèvre supérieure *B C*. Si la direction de cette lèvre est convenable, l'air du tuyau se met en vibration; mais si elle est trop ou trop peu rentrée en dedans, le tuyau parle mal, ou même ne parle pas : on modifie la lèvre peu à peu jusqu'à ce que le tuyau rende des sons nets et distincts.

L'ouverture de la bouche doit avoir une certaine grandeur qu'on trouve par le tâtonnement. Si elle est trop grande, le tuyau pourra bien ne pas parler; si elle est trop étroite, il octavi[illegible] c'est-à-dire qu'il fera entendre un

son plus élevé que le son fondamental qui convient à sa longueur.

La grandeur de la bouche, celle de la lumière, et la longueur des lèvres sont aussi assujetties à des proportions que l'expérience fait connaître. Il faut également observer un certain rapport entre la longueur et la grosseur des tuyaux. La force avec laquelle la lame d'air frappe la colonne de ce fluide contenue dans le tuyau, doit être proportionnée à la masse d'air à ébranler; le seul souffle de la bouche suffit pour les petits tuyaux, comme celui de la flûte traversière; mais pour les tuyaux d'orgues, l'emploi d'un fort soufflet est indispensable. L'extrémité du tuyau peut être fermée ou ouverte. Dans les deux cas il y a des sons produits, seulement le ton est différent. Pour les différentes formes de tuyaux, voyez les ouvrages d'acoustique. (Chladni, etc.)

Pour prouver que c'est réellement l'air qui est le corps sonore, on construit divers tuyaux égaux en diamètre, en longueur, en un mot ne différant que par la matière, on les ajuste successivement sur un tuyau conique, garni de sa bouche et de sa lumière : alors, si à l'aide d'un soufflet on introduit de l'air par l'ouverture *g*, on verra qu'il rend le même son, quelle que soit la matière. L'expérience réussit très-bien, par exemple, avec des tuyaux de verre, de cuivre, de bois ou de papier. Il est clair qu'il ne s'agit ici que du ton : quant au timbre, il est particulier à chaque substance.

Théorie des instrumens à vent.

602. Ce sujet a été soumis à l'analyse mathématique, par beaucoup de géomètres; nous ne pourrons le considérer ici que d'une manière très-élémentaire.

l'air de son intérieur en vibration, on pourra concevoir le tuyau comme composé de deux parties *A L O* et *B L O*; chaque partie formera un tuyau bouché en *A* ou en *B* et ouvert en *L O*; les déplacemens de l'air auront lieu tous dans le même sens, d'un fond à l'autre. Ainsi, tandis que les couches de la partie *A L O* se condenseront en *A*, celles de la partie *B L O* se raréfieront en *B*; la couche d'air du milieu *L O* conservera sa densité naturelle.

Si l'on fait une petite ouverture en *L*, on tirera facilement un son du tuyau *A L O B*, le ton sera le même que celui qui répond au tuyau *A B C D* de la figure 389, en supposant que la longueur de ce dernier soit la moitié de la longueur du tuyau *A L O B*.

4°. Si les vibrations se produisaient toujours ainsi, le même tuyau ne ferait entendre qu'un seul son; mais comme il est prouvé qu'on peut tirer plusieurs sons d'un même tuyau, il faut que les vibrations puissent s'y produire de plusieurs manières. Voici le mécanisme suivant lequel on conçoit qu'une même colonne d'air donne naissance à différens sons :

Qu'on partage le tuyau en parties égales, mais toujours impaires, et, en commençant par le bout fermé, qu'on prenne ces parties deux à deux, après quoi il en restera une finissant au bout ouvert. Il est évident que chaque paire de parties pourra être envisagée comme un tuyau bouché par les deux bouts. Tous ces tuyaux seront consonnans entre eux et avec le dernier qui n'a que la moitié de leur longueur et qui n'est bouché que par un bout.

Soit *A B* (*fig.* 392) un tuyau bouché par le bout *A* et ouvert par le bout *D*; qu'on imagine ce tuyau partagé en cinq parties égales *A E*, *E B*, *B F*, *F C* et *C D*. Dans

les vibrations, les couches d'air *B B*, *C C* resteront immobiles; dans les deux parties *A B* et *B C*, les vibrations se produiront comme dans un tuyau bouché par les deux bouts, et pendant que celles de la partie *A B* iront de droite à gauche, celles de la partie *B C* iront de gauche à droite, et puis celles de *C D* de droite à gauche. Cette alternative aura lieu quelle que soit la longueur du tuyau. De cette manière toutes les vibrations du tuyau seront *isochrones* et *synchrones*. Dans cette théorie, le ton du tuyau sera le même que celui d'un tuyau bouché par un bout, dont la longueur sera égale à *C D*, et dans lequel les vibrations se feront suivant la loi décrite au commencement de cet article.

Cette portion *C D* peut, d'après la construction, faire ou $\frac{1}{3}$, ou $\frac{1}{5}$, ou $\frac{1}{7}$, etc. de la longueur totale du tuyau. On sait, d'ailleurs, que les sons les plus graves des tuyaux de différentes longueurs sont en raison réciproque de ces longueurs. Ainsi, les sons accessoires qu'on peut successivement tirer d'un même tuyau sont 3, 5, 7, qui, joints au son fondamental, 1, forment la suite naturelle des nombres impairs.

Daniel Bernouilli, à l'appui de cette dernière théorie, cite une expérience dans laquelle il a tiré d'une flûte traversière, dont tous les trous étaient bouchés, successivement les sons 1, 3, 5 et 7.

Les points immobiles *B B* et *C C* (*fig.* 392) sont appelés *nœuds*, et les points intermédiaires *E* et *F* *ventres*. Dans ces derniers points, la densité de l'air ne varie pas.

Comme l'analyse montre que l'intervalle entre deux [illegible] est à la moitié de l'espace parcouru par le son [illegible] du tuyau pendant la durée d'une de ses

vibrations, cet intervalle peut être connu. Voici maintenant une expérience qui est d'accord avec la théorie précédente. Un tuyau, fermé d'un côté par un piston mobile, rend un certain son; il continue à rendre le même son quand on enfonce graduellement le piston de manière à lui faire parcourir un espace égal à l'intervalle de deux nœuds. Cette cur ence est de Bernouilli.

5°. Ce célèbre uve encore qu'il est possible de tirer, des tuy par deux bouts, des sons qui sont dans les rapp , 6... Il suffit pour cela de modifier convenablen ce du vent.

L'expérience suiva opre à donner une idée de la manière dont les sons se produisent dans les flûtes. Quand on perce dans un tuyau un trou latéral, à l'endroit d'un ventre, le son rendu par le tuyau reste le même, pourvu que l'embouchure et la manière de souffler soient les mêmes; il change au contraire si le tuyau est percé dans un autre point.

Tous les trous étant bouchés, la flûte rendra d'abord un certain son, le plus grave de tous ceux qu'elle peut produire. En variant la manière de souffler, on obtiendra une suite de sons qui formeront la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5. On en tirera encore d'autres sons intermédiaires en découvrant successivement un ou plusieurs des trous latéraux.

La série des sons rendus par le serpent et le cor, formés de tuyaux courbes, est la même que pour des tuyaux rectilignes de forme et de longueur pareilles.

(*Voyez*, outre le Mémoire de Bernouilli, la Mécanique de Lagrange et le Mémoire de M. Poisson, *Journ. de l'École*

Polytechnique, 14e cahier, ou *Ann. de ch. et ph.*, t. 10, l'Acoustique de Chladni, etc.) (1).

Instrumens à anches.

603. Il existe des tuyaux dans lesquels l'air, à son entrée, fait vibrer une lame mince de cuivre jaune appelée *anche*. Ce petit appareil est représenté dans la *fig.* 393, *A B* est la *languette* fixée en *B* sur une pièce cylindrique *E C* de bois ou de métal, creusée en gouttière. On introduit cet appareil dans une ouverture *D* demi-circulaire percée au centre d'un bouchon *H* qui ferme exactement le tuyau *m n p*; l'air introduit par l'ouverture *g* devra s'enfiler dans la gouttière pour s'échapper. Mais vu la petitesse de la gouttière relativement au diamètre du tuyau *n m p*, l'air, du moins s'il entre abondamment, pressera la languette *A B* contre la gouttière et la fermera. Elle reprendra bientôt, en vertu de son élasticité, sa position première, permettra l'entrée de l'air, sera pressée de nouveau et ainsi de suite. Si l'on fixe l'orifice *g* sur le canal d'un soufflet d'orgue, le jeu de la languette deviendra assez rapide pour que le son produit soit élevé, mais ordinairement assez rauque; c'est pourquoi on réunit d'autres tuyaux qui rendent des sons plus doux, et dont ils augmentent la force.

Le ton plus ou moins élevé du son rendu par un tuyau

(1) Voilà la théorie des instrumens à vent dans toute sa simplicité. Ajoutons que le ton fondamental, rendu par un tube d'une longueur donnée, est plus grave que ne l'indique le calcul. Le gaz hydrogène présente cette différence au plus haut degré. Le ton fourni par l'expérience est presqu'à l'octave grave du ton calculé. (*Voyez* Chladni; *voyez* le Mémoire de M. Poisson.)

à anche, dépend spécialement de la longueur de la languette comptée depuis son point d'attache; il dépend aussi de son élasticité, de sa masse, et de sa courbure, puisqu'en modifiant ces élémens on modifie aussi le ton.

Un gros fil de fer *q t*, recourbé à sa partie inférieure, est introduit à frottement dans le bouchon qui reçoit la languette; ce fil de fer est appelé *rasette*, il peut être plus ou moins enfoncé, et comme il presse par sa partie courbe sur la languette, il est employé à l'allonger ou la raccourcir, c'est-à-dire à rendre le son plus grave ou plus aigu.

Dans les instrumens à vent (tuyaux d'orgues, clarinettes, bassons...) où l'anche est en usage, elle n'est jamais employée seule; les ondes sonores qu'elle produit, sont renforcées par leur concentration dans un tuyau auquel elle transmet l'air qu'elle reçoit par sa gouttière.

Le ton d'une anche reste constant quel que soit le gaz qui la mette en vibration.

M. Grenier a fait à l'anche une modification très-importante. Il fait la gouttière *B C* en bois ou en cuivre, mais à arêtes vives, et il lui donne la forme de parallépipède plane, et la languette est en laiton. Par une rasette très-forte il la fixe à volonté. Cette languette peut entrer dans la gouttière, de sorte qu'elle ne frappe plus contre une matière solide, mais contre l'air lui-même, et le son en est beaucoup plus doux, plus égal et plus harmomieux.

C'est ici le lieu de parler de la sirène de M. Cagniard-Latour; la figure 394 la représente. Le principe de cet ingénieux instrument consiste à faire sortir un courant d'air par un petit orifice au-devant duquel est disposé un plateau circulaire, mobile sur un axe passant par son centre. Ce plateau est mis en mouvement, soit par le courant d'air,

soit par un agent mécanique. La partie de la surface du plateau qui vient successivement se présenter devant l'orifice, est percée d'ouvertures obliques, également espacées et formant un cercle autour de l'axe. On voit d'après cette disposition comment le mouvement du plateau produit un son. L'air à la sortie de l'orifice rencontrant successivement les ouvertures et le plateau, est dans le cas de l'air qui vient frapper la languette d'une anche.

M. Cagniard a trouvé que pour un égal nombre d'intermittences, le son était le même, soit que le plateau fût mis en mouvement par un courant d'air ou par un courant d'eau. (*Ann. ch. et ph.*, t. 12.)

On obtient des sons en recevant dans un tuyau de l'hydrogène en combustion; l'élévation de température détermine un courant ascensionnel de gaz et de vapeur d'eau, ce courant produit des vibrations, etc., etc. (Voyez *un Mém. de M. Faraday. An. ch. et phy.*, t. 32.)

Communication des mouvemens vibratoires.

604. La communication des sons se fait fréquemment sous nos yeux, ainsi, plusieurs instrumens placés dans un même salon, résonnent dès que l'un de ces instrumens est mis en vibration.

La construction des violons et des instrumens à cordes est fondée sur cette communication; une corde tendue sur un morceau de bois étroit, ne produirait que peu d'effet; mais si on la tend sur une table, cette table participe aux vibrations, et les effets sont singulièrement aggrandis : la table se partage en des parties vibrant alternati-

vement en deça et en delà, séparées par des lignes nodales, presque comme dans les vibrations propres des plaques. (Chladni, p. 323.)

Dans les expériences de Sauveur nous avons vu (n° 592) un exemple de la communication du mouvement.

Pour rendre plus frappante l'influence de la communication du mouvement dans les instrumens, prenez un diapason, faites-le vibrer isolément, et posez-le sur une caisse de piano, aussitôt le son éclatera avec beaucoup plus de force, et même, si avant de poser le diapason sur le piano, vous attendez qu'il ne vibre plus d'aucune manière sensible, vous entendrez encore un son très-distinct.

On trouve, par des essais répétés, que tous les points de la caisse d'un piano ne renforcent pas également tous les sons. (Chladni, p. 323.)

Ainsi, le fait de la communication par l'air ou par les corps solides, est un fait bien constaté et par les observations et par les expériences. De plus, l'analogie entre les vibrations des caisses, des instrumens et celles des plaques, a été bien aperçue par Chladni.

M. Savart a ajouté quelques faits importans que nous allons rapporter. Pour étudier le rapport entre les vibrations des cordes et celles des plaques auxquelles elles sont attachées, il fixe sur un support *mn* (*fig.* 395), deux planches de sapin *AB* et *A B'*, puis il fixe une planchette *BD* qu'il couvre de sable, enfin, il joint *B D* et *A B* par une corde de violon. On excite la corde à l'aide d'un archet, successivement dans un sens parallèle et perpendiculaire à la planchette; il détermine dans cette dernière des lignes nodales. La disposition de la forme de ces lignes montre que la planchette vibre dans le même sens que la corde

La communication des vibrations se transmet encore à un nombre de plaques ou de verges disposées les unes au-dessous des autres (*fig.* 396). Si l'on ébranle la première verge *m n*, transversalement, à l'aide d'un archet, les vibrations de cette verge se communiquent à toutes les verges qui composent le système, mais de manière que la seconde est ébranlée longitudinalement; la troisième transversalement et ainsi de suite.

Organe de l'ouïe.

605. L'étude des phénomènes d'optique nous montre avec quel art la nature a combiné les différentes parties de l'œil, comment les perfectionnemens que nous n'avons introduits que lentement dans les lunettes, se trouvent établis d'une manière admirable dans ce même organe. Nous allons voir que la nature n'est pas moins savante dans la disposition des organes de la voix et de l'ouïe.

De l'Ouïe.

606. On distingue dans l'organe de l'ouïe trois parties : *l'oreille externe, l'oreille moyenne, l'oreille interne.*

L'oreille externe comprend 1° le *pavillon,* qui est un évasement propre à recueillir les ondes sonores; 2° le *conduit auditif externe,* qui forme avec le pavillon une sorte d'entonnoir, et qui présente à son fond la *membrane du tympan.* Cette membrane élastique et médiocrement tendue propage les sons, sans être pourtant essentielle à l'audition, puisque sa rupture n'altère pas sensiblement cette faculté. La membrane du tympan sépare l'oreille externe de *l'oreille moyenne,* appelée aussi *caisse du tym-*

pan. La caisse du tympan, tapissée par une membrane humide, renferme quatre osselets connus sous les noms de *marteau*, d'*enclume*, de *lenticulaire* et d'*étrier*, formant une chaîne continue dont l'extrémité externe s'attache à la membrane du tympan et dont l'extrémité interne, constituée par la base de l'étrier, ferme une ouverture ovale, appelée fenêtre o[illegible] fond de la caisse du tympan, qui fait co[illegible] e cavité avec la partie de l'oreille interne no[illegible]n. Les quatre petits osselets dont nous ven[illegible] sont mis en mouvement par des muscles pa[illegible] autre trou, appelé fenêtre ronde, s'observe [illegible] caisse du tympan; il est fermé par une membrane.

La cavité du tympan communique avec le pharynx par le moyen d'un petit conduit (*trompe d'Eustache*) qui y permet l'introduction de l'air extérieur. On croit que sans cette communication la perception des sons n'a pas lieu.

Enfin l'oreille interne se compose 1°, en avant, du limaçon, canal osseux contourné en spirale et venant s'ouvrir dans 2° le vestibule, cavité assez grande qui est remplie par un liquide séreux, renfermé dans de petites poches membraneuses dont l'une communique avec les autres parties de l'oreille interne et dont l'autre est tout-à-fait isolée : c'est dans ce liquide que vient s'épanouir le nerf auditif; 3°, en arrière, de canaux en demi-cercles, appelés pour cette raison *demi-circulaires*, dont deux sont verticaux et un horizontal. Ces canaux communiquent entre eux et avec le vestibule. L'ensemble de ces trois parties de l'oreille interne a reçu le nom de *labyrinthe*.

D'après la disposition des différentes parties de l'organe de l'ouïe, on doit concevoir que les ondulations sonores,

choquant immédiatement la membrane du tympan, sont transmises par l'air et par la chaîne des osselets aux parois du labyrinthe, et de là, par l'intermédiaire du liquide, au nerf acoustique. L'existence de toutes ces parties est-elle une condition nécessaire pour que l'audition puisse s'opérer? Non, sans doute; car l'expérience apprend que la membrane du tympan peut être rompue et les trois premiers osselets détachés, sans que pour cela la faculté d'entendre soit perdue, pourvu toutefois que la membrane qui ferme la fenêtre ronde subsiste, et que l'étrier reste appliqué contre la fenêtre ovale. Mais si l'étrier tombe, et si la membrane qui ferme le labyrinthe se rompt de manière à laisser écouler le liquide qu'il renferme, la surdité se manifeste toujours. D'où il suit que l'existence d'un nerf acoustique et son épanouissement dans un liquide par lequel il reçoit les vibrations sonores, sont les deux seules conditions nécessaires à l'audition.

Quels sont les usages des osselets, de la forme conique du pavillon, etc.? L'examen de la construction de l'organe fait concevoir l'usage de chacune des parties qui le composent. Au reste, les expériences directes sur ce sujet sont difficiles.

On trouve chez tous les animaux un liquide dans lequel plonge le nerf acoustique. (*Voyez* les ouvrages d'anatomie et de physiologie pour les diverses particularités de l'organe de l'ouïe.)

De la voix.

607. Quelques détails sur le mécanisme de l'organe vocal sont naturellement placés à la fin des instrumens à anche, avec lesquels cet organe présente plusieurs analogies.

la bouche et le conduit guttural produisent le même effet. Ainsi le timbre de la voix sera totalement changé, si le conduit guttural est percé au-dessus du larynx; de même, quand un obstacle s'oppose au passage de l'air dans les fosses nasales, on parle du nez. Le résultat est tout différent, si le trou est pratiqué au-dessous du larynx; alors l'air sortant avant d'arriver à la glotte, les sons ne se produisent plus. De même percez le porte-vent d'une anche, et cette anche ne parlera plus. (*Voyez* l'ouvrage de M. Magendie, pour les observations qui sont relatives à ce sujet.)

L'étendue des diverses voix humaines est d'environ trois octaves; les voix des femmes et des enfans sont plus aiguës que celles des hommes faits, parce que les lèvres de la glotte sont beaucoup plus courtes chez ces individus, et que le larynx a moins de capacité.

Déjà, en 1735, l'anatomiste Senac avait présenté, dans son Anatomie, des idées très-justes sur l'organe de la voix; et Ferrein, en 1741, avait publié un mémoire rempli d'expériences qui sont tout-à-fait d'accord avec ce que nous venons de dire.

Voici quelques détails empruntés des Leçons d'Anatomie de M. Cuvier :

Les animaux à poumons (les mammifères, les oiseaux et les reptiles) sont les seuls qui aient une véritable voix. Dans tous ces animaux l'organe est un instrument à anche libre.

Les mammifères et les reptiles n'ont, comme l'homme, qu'une seule glotte placée vers le point où la trachée vient se terminer dans la bouche.

Chez les oiseaux, on trouve, à l'origine de la trachée,

au-dessus d'un renflement, appelé larynx inférieur, une lame saillante en forme d'anche; et si l'on coupe le cou à un oiseau criard très-loin de la tête, il crie comme auparavant.

(*Voyez*, pour des détails plus étendus, l'Anatomie de M. Cuvier.)

MÉTÉOROLOGIE.

608. On a donné le nom de météorologie à la partie de la physique qui traite des phénomènes qui se passent dans l'air.

La pluie, la neige, la grêle, la rosée, les brouillards et les vents, les aérolithes, l'aurore boréale, etc., feront le sujet de ce chapitre. On parlera aussi des températures des climats, de celles des lieux profonds, etc.

De la pluie et des nuages.

609. L'histoire de l'évaporation nous a appris qu'à une température donnée, un espace limité n'admet qu'une quantité limitée de vapeur, et qu'aussitôt qu'on diminue ou l'espace ou la température, la vapeur se condense et s'offre à nos regards sous différens états.

On peut en général concevoir la formation de la pluie de la manière suivante : Soient deux masses d'air saturées à des températures inégales, on trouvera, par la théorie, qu'en vertu de la loi du rapide accroissement de la force élastique des vapeurs (n° 96, et additions), l'espace sera sursaturé, et laissera précipiter une partie de l'eau qu'il contient.

En effet, soient OA et OB (*fig.* 397) les températures

de deux volumes d'air; soient AC et BD les élasticités ou les quantités de vapeur que chacun renferme, la quantité de vapeur dans chaque volume, après le mélange, sera $\frac{AC+BD}{2}$, ou EF. Mais EF est plus grand que EH, qui représente la quantité de vapeur correspondante à la température du mé[illegible] précipitera donc une quantité de vapeur égal[illegible]

On remarquera [illegible] pour que la précipitation ait lieu, que la cou[illegible] présente la loi des quantités de vapeur de l'air soit [illegible] rs l'axe des abscisses OB, ou que ces quantités [illegible] lus que proportionnellement à la température.

La précipitation est d'autant plus considérable, que la température est plus élevée. Aussi, dans les pays les plus chauds et dans les saisons les plus chaudes, tombe-t-il de l'eau en plus grande abondance. (*Voyez* plus loin.)

M. Leslie pense même que le frottement de deux masses d'air saturé, et à des températures différentes, suffit à la production d'une pluie légère (*Heat and moisture*, 130).

L'explication précédente de la formation de la pluie suppose l'existence des courans d'air. On a remarqué, en effet, 1° que la pluie est rare sous une direction constante du vent, mais qu'il pleut souvent par un changement de vent; 2° que, sous les tropiques, la saison pluvieuse arrive au moment où le soleil approche du zénith, époque de la plus grande variation des vents.

Il est rare que dans nos climats il pleuve sans changement de vent, et, réciproquement, que le changement de vent n'entraîne pas la formation de la pluie.

Nous avons dit que l'abaissement du baromètre est en

général un indice de mauvais temps; le changement de pression dans l'atmosphère, indique une rupture d'équilibre, et conséquemment des agitations plus ou moins fortes.

Il y a des étendues considérables de pays où il ne pleut presque jamais; ce sont les contrées placées dans l'intérieur des continens, et privées de montagnes; les montagnes contribuent au mélange des différentes couches d'air.

Si dans ces désorts il se trouve une montagne, elle détermine la précipitation de l'humidité, qui apparaît plus souvent sous forme de rosée.

610. La quantité d'eau qui tombe dans un même pays varie d'une année à l'autre; mais, quand on prend plusieurs groupes d'années, la moyenne varie peu. Du moins voilà ce que M. Arago a remarqué pour Paris, en discutant des observations continuées pendant l'espace de 130 ans.

Le pays dans lequel il tombe plus de 25 pouces d'eau, est humide.

Le tableau suivant donne à peu près la quantité moyenne d'eau qui tombe annuellement dans différens lieux.

	Centimètres.		Centimètres.
Cap Français (Saint-Domingue).	308	Milan	94
La Grenade (aux Antilles) ...	284	Liverpool	86
Tivoli (Saint-Domingue)	273	Manchester	84
Garfagnana (duché de Modène).	249	Venise	81
Calcutta	205	Lille	76
Kendal (Angleterre)	156	Utrecht	73
Gênes	140	Londres	53
Charlestown	130	Paris	53
Pise	124	Pétersbourg	46
Naples	95	Upsal	43
Douvres	95		

L'inspection seule de ce tableau montre que la quantité d'eau tombée est d'autant plus grande qu'on s'approche davantage de l'équateur. Cette conséquence est tout-à-fait

d'accord avec les observations de M. de Humboldt, qui prouvent que l'air est d'autant plus humide, que le lieu est plus rapproché de l'équateur.

ÉPOQUES DE L'OBSERVATION.	Latit. du lieu.	DONNÉES.		Quantités de vapeurs contenues dans l'air.	
		Therm	Hygr.	à satur. gramm.	réelles gramm.
9 juin 1799....	39°,10'	14°,5	82°,0	14,6	11,1
15.....	30°,36'	10°,0	85°,7	20,0	16,2
16.....	29°,18'	20°,0	83°,8	20,0	16,7
30.....	18°,35'	21°,2	81°,5	21,3	16,0
4 juillet.....	16°,19'	22°,5	88°,0	22,9	19,0
10.....	12°,34'	24°,0	89°,0	24,8	21,5
12.....	10°,46'	25°,4	90°,0	26,7	23,3
14.....	11°, 1'	25°,0	92°,0	26,8	23,8

L'hydromètre (instrument propre à mesurer la quantité d'eau tombée) consiste en un entonnoir évasé, dont la pointe plonge dans un vase fermé (*fig.* 398). De temps à autre, on reçoit l'eau du vase inférieur dans un autre vase dont la capacité a pour mesure la surface de l'entonnoir × un millimètre, en sorte que le nombre de ces mesures indique le nombre de centimètres d'eau tombée dans le lieu des observations.

Deux instrumens semblables sont placés à l'Observatoire de Paris, l'un dans la cour, l'autre au haut de l'Ob-

servatoire. L'hydromètre placé dans la cour indique toujours une quantité d'eau plus grande, différence qui tient à l'inclinaison de la pluie, qui est d'autant moindre, qu'elle approche plus de la surface de la terre. Voici quelques résultats :

RÉSULTAT.

Pluie sur la plate-forme de l'Observatoire, à 28m.		Pluie dans la cour. cent.
1822	42,3	47,7
1821	58,4	54,6

A égalité de latitude, la quantité de pluie qui tombe dans un pays, est modifiée par la localité, la forme, etc. de ce pays.

Ainsi les montagnes d'un pays voisin de la mer, détermineront le refroidissement de l'air saturé apporté par la mer et conséquemment la précipitation d'une quantité d'eau considérable. C'est ainsi qu'on explique les pluies fréquentes de la Norwège, des côtes occidentales et orientales de l'Afrique, la sécheresse des environs de Madrid. L'air qui vient de la mer, a abandonné la majeure partie de son humidité, sur les sommets froids des montagnes qui bornent le plateau central, et il arrive très-sec à Madrid.

611. D'après Saussure, la vapeur, au moment où elle se précipite de l'air, se transforme en une multitude de petites sphères creuses, qu'on a désignées sous le nom de *vésicules*. Les nuages et les brouillards sont formés par un assemblage de ces vésicules. Saussure les a examinées

à l'aide d'une lentille; il a reconnu qu'elles étaient sphériques; de plus, placé dans un nuage, il a vu les particules dont ce nuage était composé flotter et voltiger dans l'air avec une légèreté qui prouvait qu'elles étaient creuses. Saussure s'est aussi assuré, et toujours en se servant d'une lentille, que la fumée qui se forme dans l'air au-dessus d'un liquide noir, est composée de grains arrondis et blanchâtres. On sait depuis long-temps que les nuages ne forment pas d'arc-en-ciel, ce qui vient encore à l'appui de l'opinion qui les regarde comme composés de vésicules creuses.

612. M. Fresnel a donné récemment une explication de l'ascension des nuages, indépendante de la constitution des globules d'eau ou de vapeur vésiculaire qui les composent, et également applicable au cas où un nuage serait formé d'un assemblage de cristaux de neige extrêmement déliés, comme cela peut avoir lieu pour les hautes régions de l'atmosphère, et comme on l'admet pour les halos, etc.

M. Fresnel fonde son explication sur la propriété que l'air et tous les autres gaz possèdent de laisser passer les rayons solaires, et même la chaleur rayonnante, sans s'échauffer sensiblement; et que, pour élever leur température, il faut le contact des corps solides ou liquides échauffés par ces mêmes rayons lumineux ou calorifiques. Cela posé, si un nuage est formé de globules d'eau ou de cristaux de glaces très-déliés, ces globules ou cristaux s'échaufferont par les rayons solaires, et élèveront ensuite la température de l'air avec lequel ils sont mélangés, de sorte qu'on conçoit que l'air compris dans l'intérieur du nuage ou très-voisin de sa surface, sera plus léger que l'air

environnant. Lorsque le poids total du nuage sera plus faible que le poids d'un volume égal d'air, le nuage s'élèvera, jusqu'à ce qu'il se trouve dans une région où la densité de l'air soit égale à la sienne.

L'air de l'intérieur du nuage doit sans doute se dégager peu à peu, mais avec lenteur, à cause de la petitesse des intervalles laissés entre les globules; d'ailleurs ce mouvement de l'air favorise encore l'ascension des nuages.

Pendant la nuit le nuage est privé des rayons solaires, et sa température diminue; et l'on conçoit que, s'il a beaucoup d'épaisseur, cette diminution sera lente.

D'ailleurs il continue à recevoir les rayons calorifiques envoyés par la terre, ce qui contribue encore à retarder son refroidissement; au reste, on remarque généralement qu'après le coucher du soleil les nuages s'abaissent sensiblement, ce qui est conforme à cette théorie.

Comment un nuage, formé de petits glaçons, produira-t-il la pluie? Si l'abaissement de température devient assez grand pour que le nuage l'emporte en densité sur l'air environnant, ce nuage tombera, et, rencontrant dans sa chute des couches d'air chaud, il pourra se changer en pluie, même dans le cas où il serait formé de glaçons.

Quelle que soit la constitution des nuages, leur ascension et leur suspension dans l'air dépend de leur pesanteur spécifique, qui doit être moindre que celle de l'air environnant, et des courans d'air échauffé par le contact de la terre. Les nuages se tiennent en général à 2000 mètres. On en voit quelquefois qui touchent les sommets des édifices peu élevés, et d'autres qui paraissent à plus de 3000 mètres. *Voyez* L'ouvrage de S[illegible] [illegible]vations de M. Gay-Lussac (*An. ch.* [illegible]

De la rosée.

613. L'histoire complète de la rosée a été faite (n° 170).

De la gelée blanche.

614. L'explication de la formation de la gelée blanche, du givre, est la même que celle que nous avons donnée de la formation de la glace artificielle (n° 177).

Des brouillards.

615. 1°. Les brouillards, en général, sont une suite du refroidissement nocturne de l'atmosphère. L'air, par son rapide refroidissement, se trouvant sur-saturé, une partie de la vapeur qu'il renferme se précipite et forme un nuage. Voilà la formation des brouillards ordinaires.

L'augmentation de chaleur qui a lieu pendant le jour, par suite de la présence du soleil sur l'horizon, fait souvent évanouir le brouillard formé pendant la nuit, et rend à l'air sa transparence primitive. Ceci est tout simple, puisque la quantité de vapeur que peut admettre l'air, devient plus considérable à mesure que la température de ce fluide s'élève davantage (n° 118).

2°. Les lacs, les rivières, etc., présentent aussi souvent, le matin, des brouillards; sir H. Davy a annoncé qu'il ne se forme des brouillards sur les eaux tranquilles ou courantes que dans le cas où la température de l'eau surpasse celle de la terre environnante. L'air en contact avec la terre étant plus froid que celui qui est en contact avec l'eau, doit refroidir ce dernier s'il vient à s'y mélanger, et conséquemment précipiter une partie de la vapeur

qu'il renferme. Sir H. Davy cite à l'appui de son opinion des expériences faites sur le Danube, l'Inn, etc. M. George Harvey s'est occupé depuis de la formation des brouillards sur les eaux; et quoiqu'il embrasse l'opinion de M. Davy, ses observations ne sont pas toutes d'accord avec cette opinion. En effet, dans plusieurs observations qu'il rapporte, la température de l'air sur le sol environnant, était plus élevée que celle de l'air et de l'eau sur laquelle se formait le brouillard.

Nous trouverons dans le même Mémoire des observations qui montrent que l'infériorité de la température de l'air sur celle de l'eau n'est pas toujours une cause suffisante de la formation d'un brouillard; par exemple, pendant la pluie cette infériorité peut exister sans qu'il y ait brouillard au-dessus de l'eau.

Nous n'admettrons pas d'une manière absolue l'explication de l'illustre physicien anglais, et nous dirons: L'air pendant la nuit est plus froid que la terre. Les couches d'air en contact avec l'eau s'échauffent et se saturent de vapeur. Le mélange de la vapeur avec ces couches d'air, l'élévation de température les rendent spécifiquement plus légères. Elles s'élèvent, et rencontrant des couches d'air froid, elles se refroidissent aussi et laissent précipiter de la vapeur. Le nuage résultant de cette précipitation ne doit se montrer qu'à une faible hauteur à cause de l'uniformité de température qui s'établit bientôt. De plus, on voit dans cette explication pourquoi la pluie ou une grande agitation de l'air s'oppose à la formation des brouillards au-dessus des eaux. Je tente, au reste, dans ce moment, des expériences sur ce sujet.

3°. Il y a aussi des brouillards plus rares, et dont la cause n'est pas bien connue. En 1783, un brouillard de cette espèce couvrit toute l'Europe pendant près de deux mois; le 18 août 1821, un brouillard qui affaiblissait le soleil au point qu'on pouvait regarder cet astre à l'œil nu, fut d'abord observé, dans le comté d'Essex en Angleterre, par M. Forster. Le même brouillard fut observé entre 9 et 10 heures du matin par M. Howard, dans le comté de Sussex. Il se manifesta à Paris, mais seulement vers 6 heures du soir. M. Flaugergues le remarqua le 25 au matin, à Viviers, en Dauphiné. Enfin, d'après ce dernier savant, le brouillard ne se dissipa que le 30 août.

Le 21 mai, en 1822, vers 5 heures du soir, il se répandit à Paris et dans les environs un brouillard ayant l'odeur du gaz nitreux; à 10 heures ½ du soir il avait disparu. La marche de l'aiguille aimantée n'a pas été troublée par la présence de ce brouillard remarquable sur l'horizon. Il ne paraît pas d'après cela exister d'analogie entre les brouillards et l'aurore boréale. Dans les régions équinoxiales, des brouillards se maintiennent souvent pendant une partie de l'année. C'est ce qui arriva en 1785 à Bahia (M. Dorta). Un brouillard se forma au mois d'avril, en 1786, à Rio-Janeiro, et ne disparut qu'à la fin de l'année. M. de Humboldt rapporte aussi que Lima est souvent couvert de brouillards la moitié de l'année, surtout le soir et le matin, et que sur la presque totalité de la côte, les brouillards remplacent les pluies qui sont extrêmement rares dans ces contrées.

D'épais brouillards règnent souvent même pendant les mois les plus chauds sur les mers polaires; ils sont telle-

ment épais que la vue ne s'y étend qu'à la distance de quelques pas. La mer qui baigne les côtes du Spitzberg et du Groenland, est très-souvent aussi couverte de brouillards.

M. Berg, officier russe, parle aussi d'une espèce de brouillard qu'il nomme fumée. Ce brouillard paraît sortir de la mer dans les temps orageux, et s'élever jusqu'à cent pieds de hauteur. D'après ce même voyageur le brouillard dont il est ici question ne se manifeste que lorsque la température de la mer est élevée à 25 degrés.

De la Neige.

616. Lorsque la température de l'air en s'abaissant est arrivée au degré de la congélation, les gouttes d'eau qui résultent de la condensation des vésicules dont sont formés les nuages, se convertissent en neige et forment dans leur chute, par leur réunion, des étoiles à six rayons, si leur cristallisation s'opère au milieu d'un air calme; et au contraire ne forment que des flocons irréguliers si l'air est agité.

L'explication de la formation de la neige sera peu différente dans le cas où l'on supposera les nuages formés de petits glaçons (n° 610).

Les navigateurs ont trouvé de la neige rouge à la baie de Baffin, dans l'hémisphère boréal; à la Nouvelle-Shetland, dans l'hémisphère austral. M. le botaniste Francis Bauer a reconnu, à l'aide du microscope, que la couleur des neiges polaires est due à la présence d'un très-petit champignon du genre *uredo*.

Au Saint-Bernard la neige rouge est permanente, on la

voit presque toujours aux mêmes endroits, le plus ordinairement sur des plateaux dominés par des pentes chargées de neige. (M. Billely, prieur du Saint-Bernard.)

Il vient d'être reconnu que la neige rouge des Alpes est identique avec celle des pôles.

M. le capitaine Scoresby a observé avec soin, dans les régions boréales, les diverses formes qu'affecte la neige, il en compte 48. La figure 400 présente les principales.

On y voit en général une tendance vers la forme à six rayons, observée depuis si long-temps.

La neige tombe quelquefois en si grande quantité dans le nord, qu'elle couvre des habitations entières.

Voyez plus loin les limites des neiges perpétuelles.

De la Grêle.

617. La grêle qui paraît avoir une grande analogie avec la neige, en diffère surtout par l'époque de sa formation.

Dans l'ancienne explication, on supposait que la grêle devait son origine à une eau de pluie dont les gouttes s'étaient congelées au haut de l'atmosphère. Ces globules, dans leur chute, rencontraient de nouvelles gouttes liquides, dont les molécules congelées par leur contact, s'arrangeaient autour d'elles par couches concentriques, et augmentaient ainsi leur volume.

Mais cette explication avait contre elle une difficulté assez grande; c'est que l'intervalle qui existe en général entre la surface de la terre et les nuages ne paraît pas assez considérable pour que les grains de grêle acquièrent un accroissement de poids qui va quelquefois jusqu'à cinquante grammes ou davantage.

[redacted]

L'explication de Volta rend raison de la formation des plus grosses masses de grêle. Voici en quoi elle consiste.

Volta suppose deux nuages orageux superposés et dans des états contraires d'électricité; ces deux nuages sont situés à une distance telle qu'ils peuvent exercer sur des grains de grêle, placés dans leur intervalle, une action assez puissante pour la production du phénomène. Supposons que dans le nuage supérieur, par un refroidissement dû à une évaporation subite ou à toute autre cause, il se soit formé des grains de grêle; ils tendront à tomber en vertu de leur poids, et seront repoussés par le nuage dont ils partagent l'électricité; et attirés par le nuage inférieur; celui-ci, après leur avoir fait partager son électricité, les repoussera à son tour et ainsi de suite. Ces grains de grêle, rencontrant sur leur passage la vapeur aqueuse contenue dans l'air, la condensent et peuvent ainsi s'accroître dans leur volume, jusqu'à ce que l'action de la pesanteur les précipite vers la terre.

Un fait vient à l'appui de cette explication, c'est qu'avant la chute de la grêle on entend souvent un bruit semblable à celui que feraient entendre des corps durs qui, agités par un mouvement rapide, se heurteraient les uns contre les autres.

Il doit arriver aussi que la grêle passe par diverses époques d'accroissement. L'examen des derniers grelons (juillet 1827) m'a fait voir que la plupart étaient formés de couches concentriques, alternativement opaques et transparentes. Une succession de couches aussi tranchées indique évidemment diverses époques de formation. Le premier noyau de beaucoup de grelons était demi-transpa-

rent, la couche environnante était transparente; celle qui enveloppait celle-ci était opaque et blanchâtre, semblable à la glace qu'on obtient par la congélation artificielle d'une eau gazeuse.

Trombe.

618. La trombe se montre en mer et sur la terre; tantôt elle semble sortir du sein de la mer et s'élève jusqu'aux nuages; tantôt elle descend des nuages jusqu'à terre.

C'est une colonne d'eau conique qui tourne sur elle-même avec une grande vitesse; elle a quelquefois jusqu'à plus de deux cents mètres de base. Elles est très-commune entre les tropiques; les navigateurs passent rarement près des côtes de Guinée sans en apercevoir plusieurs.

Les trombes produisent des effets terribles; elles déracinent les arbres, renversent les faibles habitations, soulèvent les voitures, etc.

On peut se faire une idée des trombes par les tourbillons de poussière qui se forment tout-à-coup en été sur les routes et qui tournent sur eux-mêmes avec une grande rapidité.

Nous citerons quelques faits récens. Le 6 juillet, à $1^h \frac{1}{2}$, en 1822, les laboureurs d'un village (du Pas-de-Calais) durent quitter leurs charrues à cause de l'obscurité et dans la crainte d'un orage. Des nuages, venant de différens points, se rassemblèrent tout-à-coup; bientôt du sein du nuage formé de leur réunion, on vit descendre un cone renversé, formé de vapeur bleuâtre; une partie se détacha, creusa le sol à plusieurs pieds de profondeur, se releva

avec un bruit semblable à celui d'une bombe qui tombe en éclat; elle s'éloigna avec une grande vitesse, arracha des arbres, renversa des granges, des habitations, creusa la terre, etc.; elle tournait avec rapidité, lançait des étincelles bleuâtres, etc. Le bruit du mouvement de ce terrible météore ressemblait à celui d'une forte voiture. Elle se partagea en plusieurs parties, et enfin se dissipa à 3h avec le tonnerre, qui n'avait cessé de se faire entendre sur tous les points de l'horizon.

La même année, en mars, un navigateur vit à 4° latitude nord une trombe s'approcher de son bâtiment avec un bruit épouvantable; quelques coups de fusil la rompirent en deux parties, dont l'inférieure alla remplir la cavité que la trombe avait produite dans la mer, et dont l'autre monta vers le nuage. Dans cette circonstance, quelques coups de fusil ont dissipé la trombe; souvent des coups de canon n'ont pas un résultat aussi heureux.

La même année, le 24 août, il parut, après une journée très-chaude, une trombe qui avait plus de deux cents mètres de base, et qui touchait les nues par son sommet; l'ouragan qui lui avait donné naissance lança des grelons de la grosseur du poing, rompit des voitures, détruisit un village, etc.

Une trombe qui produisit, en 1823, de grands ravages, absorba en un instant les eaux d'une petite rivière.

Nous pourrions citer mille autres faits analogues.

L'apparition de la trombe étant souvent accompagnée de tonnerre, il est tout simple qu'on ait fait jouer un rôle à l'électricité dans sa production. Mais on ne connaît pas encore la théorie de ce phénomène.

Halos.

619. Ce sont des couronnes lumineuses presque circulaires, qui se montrent quelquefois autour du soleil et de la lune. Ordinairement il n'y en a qu'une seule, et son diamètre constant est d'environ 45°; s'il s'en forme une seconde, son diamètre est double. On n'a pas observé de couleurs dans les halos de la lune. Lorsque les halos du soleil sont colorés, le rouge est au-dedans et toujours plus prononcé, l'indigo au-dehors; la largeur de la bande colorée, du rouge à l'indigo, est de 1 degré.

Descartes a supposé les halos formés de petites étoiles de neige; Huyghens de petites sphères; enfin Mariotte de petits prismes de glace, dont l'angle réfringent serait de 60°; M. Arago a prouvé que l'hypothèse de Mariotte est conforme à la vérité.

En effet, il s'est assuré, en comparant dans le plan vertical deux faisceaux, l'un partant de l'intérieur ou du contour de la couronne, l'autre réfléchi sur un plan horizontal que les portions de lumière polarisée que contiennent ces deux faisceaux sont polarisés dans des plans perpendiculaires l'un à l'autre; il suit de là que la portion de lumière polarisée, transmise par le halo, est polarisée par réfraction. (*Bulletin de la Société philomatique*, 1825.)

Des Aérolithes.

620. Quelques détails sur les aérolithes et les masses de fer isolées ne seront peut-être pas déplacés ici.

Quoique le fer ait une grande affinité pour l'oxygène, puisqu'il s'y unit à la température ordinaire et le retient aux températures les plus élevées, il se trouve cependant

à l'état de pureté dans la nature, à la vérité en masse peu considérable. On en trouve dans plusieurs lieux.

La prompte oxidation que le fer subit sous nos yeux, doit faire penser que ces masses ferrugineuses ne sont exposées à l'action de l'air que depuis un petit nombre d'années. Aussi les peuples des contrées qui en possèdent les croient-ils tombées du ciel. Cette opinion nous paraît d'autant plus fondée, que depuis 1785 on a observé assez fréquemment la chute des pierres; de plus on a remarqué une grande ressemblance entre les pierres tombées récemment et les masses anciennement connues. Toutes sont caverneuses, présentent à leur surface une matière vitreuse. On conçoit bien et l'oxidation du métal et la formation du verre, puisque toutes les aérolithes au moment de leur chute, qui se fait avec une grande vitesse, sont à une température assez élevée pour paraître lumineuses.

D'après les analyses de MM. Howard, Klaproth, Vauquelin, Stromeyer, Laugier, la composition chimique des aérolithes est environ 50 de silice, 25 de fer presqu'entièrement oxidé; 5,5 de manganèse; 4,5 de soufre; 2,5 de nickel métallique; 1,5 de manganèse oxidé; 1,5 de chrome et des traces de cobalt; leur pesanteur spécifique est 3,6 environ. L'état des différentes substances qui composent une aérolithe doit dépendre du volume; l'oxidation d'une pierre d'un petit volume doit être complète, tandis qu'une pierre d'un poids considérable présentera du fer, du manganèse, et même du silicium à l'état de pureté. Ainsi la masse de fer de Sibérie (connue sous le nom de fer de Pallas) qui est formée de toutes les substances qui entrent dans la composition des aérolithes, renferme beaucoup de fer à l'état métallique.

La chute des pierres (aérolithes), est un fait incontestable; l'identité de composition des masses de fer isolées, et des aérolithes, leur assigne une origine commune. Sont-elles lancées par des volcans lunaires (1); ou bien proviennent-elles des débris des petites planètes, qui, se trouvant engagées dans l'atmosphère, et qui, animées d'une immense vitesse, s'y enflamment par leur frottement contre l'air (2), et tombent par leur pesanteur? C'est une question sur laquelle il ne nous appartient pas de prononcer.

Le feu Saint-Elme se montre en mer pendant les tempêtes, sous la forme d'un feu violet, très-mobile, étincelant, se dirigeant vers les pointes, etc. La production des feux follets qui apparaissent au-dessus des cimetières et des marais, etc., a été attribuée à la réaction des matières alcalines du sol, de l'eau et du phosphore, que renferment la matière cérébrale de l'homme, certaines parties de poissons, etc.

On pense que les feux épars, les étoiles tombantes, sont le résultat des décharges électriques, produites dans les hautes régions de l'atmosphère.

Aurore boréale.

621. Quoiqu'un Traité élémentaire ne doive être que l'histoire des faits les mieux connus, nous donnerons ce-

---

(1) On a calculé qu'il suffisait pour cela d'une force quadruble de celle d'un boulet lancé par 12 livres de poudre.

(2) Ces météores enflammés ont reçu le nom de bolides. On en voit tomber fréquemment.

pendant quelques détails sur l'aurore boréale, phénomène sur lequel des observations récentes ont jeté quelque lumière.

L'aurore boréale se montre dans notre hémisphère du côté nord, en tirant un peu vers l'ouest. Ordinairement elle s'annonce d'abord par une espèce de brouillard, qui présente dans un temps calme à peu près la forme d'un segment de cercle, dont la partie convexe est le point le plus élevé.

Ce segment paraît bientôt bordé d'arcs concentriques, séparés par des bandes obscures. Il part de la partie obscure du segment, des jets de lumière qui se renouvellent quelquefois avec tant de rapidité, que le segment semble être en mouvement. Enfin le phénomène paraît dans toute sa magnificence; le segment a acquis sa plus grande extension. Il se manifeste au zénith une couronne enflammée qui paraît être le centre vers lequel tous les mouvemens se dirigent. Ensuite le phénomène diminue graduellement, les jets de lumière et les vibrations sont plus rares; toute la lumière se concentre vers le nord, enfin tout disparaît. Toutes les aurores boréales ne présentent pas ces diverses particularités, il s'agit ici d'une grande aurore boréale.

L'aurore boréale se passe dans notre atmosphère, puisqu'elle est emportée avec elle dans le mouvement de rotation du globe.

Différentes explications ont été proposées relativement à l'aurore boréale.

Francklin pensait que l'électricité, transportée de l'équateur aux pôles par les nuages, descendait avec la neige sur la glace qui couvre les régions polaires. Cette électri-

cité, après s'être accumulée aux pôles, remontait à travers l'atmosphère.

Selon Mairan, l'aurore est produite par la chute d'une portion de l'atmosphère solaire, attirée par la terre dans les momens de plus grande proximité. Le phénomène apparaît vers les pôles, parce que les molécules d'air de l'équateur, ayant une grande vitesse, repoussent vers ces régions les molécules de l'atmosphère solaire que la terre a attirées.

L'opinion d'Euler est encore toute différente des précédentes. D'après ce célèbre géomètre, les rayons solaires exercent une impulsion sur les particules de l'atmosphère, les chassent à une grande distance et les rendent lumineuses en se réfléchissant sur leurs surfaces.

Enfin, d'autres physiciens pensent qu'il y a une liaison intime entre les causes de l'aurore boréale et celles du magnétisme terrestre. En effet, outre la correspondance déjà remarquée entre l'apparition de l'aurore boréale et les mouvemens irréguliers de l'aiguille, et qui sont d'autant plus sensibles que l'aurore boréale paraît plus active et plus répandue, on a reconnu 1° que les arcs concentriques reposent sur des points également éloignés du méridien magnétique; 2° que le point le plus élevé de chaque arc se trouve dans le méridien; 3° que le point où les rayons lumineux, partis de l'horizon, se réunissent, est précisément celui vers lequel se dirige une aiguille aimantée, suspendue par son centre de gravité.

Il n'est pas nécessaire que l'aurore boréale soit visible dans un lieu, pour que la boussole y soit agitée; M. Arago à Paris, M. Skupffer à Kasan, ont observé une agitation pareille le 13 novembre 1825. A la même époque, une

aurore boréale était visible dans le nord de l'Écosse; tandis qu'on ne l'apercevait ni de Paris, ni de Kasan.

Il faut convenir qu'il est difficile de ne pas voir dans ces diverses circonstances des indices d'un lien caché existant entre l'aurore boréale et les phénomènes magnétiques.

M. Biot, dans son voyage aux îles Schetland, a observé une grande aurore boréale; il n'a reconnu aucune trace de polarisation dans la lumière qui en émanait; d'où il a conclu que la lumière était produite au point d'où partaient les jets lumineux. Le même savant a proposé une théorie de l'aurore boréale, que les bornes de cet ouvrage ne nous permettent pas de rapporter.

Électricité atmosphérique.

622. Nous avons vu qu'un grand nombre de phénomènes donnent lieu à un développement d'électricité; nous avons vu, n° 356, comment on détermine la présence de l'électricité dans l'atmosphère; comment, à l'aide des paratonnerres, on enlève aux nuages la foudre qu'ils portent dans les différentes régions de l'atmosphère.

Les physiciens, et particulièrement Saussure, ont reconnu que les nuages sont toujours plus ou moins chargés d'électricité; que l'électricité est plus considérable dans un lieu élevé qu'à la surface du sol; qu'elle est en général positive dans les temps sereins, tant en été qu'en hiver; que la force de l'électricité diminue vers le milieu du jour; que, dans les temps orageux et agités, la nature de l'électricité varie à chaque instant. Saussure dit (*Voyage aux Alpes*) que ces variations se succèdent quelquefois

avec tant de rapidité, qu'on n'a pas le temps de les noter; que les brouillards, en faisant descendre l'électricité des hautes régions de l'atmosphère, la rendent plus sensible à la surface de la terre.

Saussure et Volta ont bien constaté que, dans l'évaporation, il se produit une quantité notable d'électricité; mais ils n'ont pas été toujours d'accord sur la nature de l'électricité produite. M. Pouillet a vu, par des expériences soignées, qu'il ne se développe pas d'électricité dans la volatilisation de l'eau pure, mais qu'il s'en développe si l'eau contient quelque matière acide, saline ou alcaline, et qu'une dissolution de sel marin donne une vapeur chargée d'électricité positive. Il est clair que la dissolution d'où émane la vapeur, est électrisée négativement. Cette expérience est fort importante, en ce qu'elle ne laisse plus d'incertitude sur une des sources principales de l'électricité atmosphérique.

Des vents.

623. La cause principale des vents, du moins la cause des vents généraux, est l'inégale distribution de la chaleur dans l'atmosphère. Les quantités d'air transportées par les courans opposés, sont sensiblement égales, puisque la hauteur du baromètre est à peu près la même sur tous les points du globe.

On distingue plusieurs espèces de vents. On appelle vents *généraux* ou vents *alisés* ceux dont la direction est constante; ils règnent entre les tropiques.

Les vents *périodiques*, *moussons*, soufflent dans une certaine direction pendant plusieurs mois, et sont suivis de vents contraires d'une égale durée.

On donne le nom de vents irréguliers à ceux qui soufflent de différens côtés, sans observer ni époque, ni durée déterminée : ce sont les vents les plus ordinaires dans les zones tempérées. Il arrive assez communément que plusieurs de ces vents soufflent en même temps à des hauteurs différentes. Pour s'en convaincre, qu'on regarde les nuages, on en verra, même pendant un temps peu agité, se diriger dans toutes sortes de directions.

624. Il suffit du plus petit changement de densité dans une partie d'une masse fluide, pour y déterminer des courans. Par exemple, dans un appartement à cheminée, l'air, échauffé par le foyer et rendu conséquemment plus léger, s'échappe en partie par le tuyau de la cheminée, et l'autre va gagner le haut de l'appartement. En même temps l'air du dehors arrive pour remplacer l'air ascendant, et il en résulte une succession non interrompue de deux courans contraires, l'un inférieur qui se dirige de la porte vers la cheminée, l'autre supérieur qui s'éloigne de cette dernière. L'existence de ces deux courans se constate en plaçant une bougie tour à tour dans le bas et dans le haut de l'appartement. On voit la flamme s'incliner dans les deux directions indiquées.

Cette expérience conduit naturellement à l'explication du vent d'est; la voici : L'air de la zône torride, échauffé fortement par le soleil, s'élève et se répand vers les pôles. L'air froid des pôles se dirige vers l'équateur pour remplacer le vide formé par l'ascension d'une partie de l'air de l'équateur. Il se forme donc dans chaque hémisphère deux courans, l'un supérieur qui se porte de l'équateur aux pôles, et l'autre inférieur qui va des pôles à l'équateur.

Maintenant les molécules d'air de chaque zône ont une

vitesse de rotation qui est d'autant plus petite que la zône est plus rapprochée des pôles; les molécules du courant inférieur, arrivées à l'équateur, ont donc une vitesse moindre que celles du point correspondant pris à la surface de la terre. Un observateur, placé à l'équateur, frappera donc ces molécules avec un excès de vitesse, et rapportant l'excès de sa propre vitesse en sens opposé, il croira recevoir l'impression d'un vent dirigé d'est à l'ouest, puisque le mouvement de la terre se fait de l'ouest à l'est. On conçoit, pour le courant supérieur, que chacune de ses molécules possédant une vitesse plus grande que celle des points de la terre au-dessus desquels elle arrive, doit produire l'effet d'un vent d'ouest réel, tandis que le vent inférieur n'est qu'une apparence.

625. L'influence des vents alisés est très-remarquable. Ces vents soufflent de l'est à l'ouest à travers le continent de l'Afrique rempli de déserts, et produisent sur sa côte occidentale une chaleur plus intense que celle que l'on éprouve sur sa côte orientale. Ils passent ensuite sur l'Océan atlantique où ils sont considérablement rafraîchis, traversent l'Amérique méridionale, etc.

626. L'explication de la périodicité des vents qui soufflent près des bords de la mer, est fondée sur les mêmes faits. La température de la mer n'éprouvant jamais de variations aussi grandes que celle de la terre, il en résulte que, pendant la nuit, la mer doit être plus chaude que la terre. L'air de la mer, rendu plus léger par une plus grande dilatation, se répand par un courant supérieur sur le continent, et l'air du continent se porte par un courant inférieur sur la mer. Pendant le jour, la mer étant plus froide, la direction des courans est inverse.

Les vents diminuent les différences que présenteraient les températures des continens et des mers.

627. Les terres qui avoisinent les mers n'éprouvent pas des étés aussi chauds ni des hivers aussi rigoureux que les pays placés sous les mêmes latitudes dans l'intérieur des terres; les vents qui règnent toujours sur les bords des mers leur font partager la température moyenne qui règne sur les masses d'eau considérables. C'est ainsi qu'on peut cultiver l'olivier sur les côtes de Bretagne, tandis que la culture en est impossible dans des contrées beaucoup plus méridionales.

628. La vitesse du vent est très-variable. Kraaf l'a trouvée à Pétersbourg, un jour, de 109 pieds, un autre jour, de 129 pieds par seconde; elle peut être beaucoup plus grande et beaucoup plus petite.

629. Les vents renouvellent l'air des grandes villes; ils transportent les nuages, les graines, etc.; l'impulsion du vent dirige les navires; reçue obliquement sur les ailes des moulins, elle met ces machines en mouvement.

D'après le n° 609, les vents doivent exercer une influence marquée sur la production de la pluie.

A Paris, les vents d'ouest sont les plus pluvieux, et les vents d'est les plus secs.

Températures des différens climats.

630. Avant de parler des températures, nous donnerons une idée succincte des thermomètres à minimum et maximum. Plusieurs thermomètres à minimum et maximum ont été proposés. Nous dirons ici quelques mots de celui qui porte le nom de thermomètre de Rutherford. Il se compose de deux thermomètres horizontaux (fig. 401),

Le thermomètre à maximum est à mercure, le thermomètre à minimum est à alcool. Dans la figure, le premier est en haut. Un cylindre de fer est placé sur le mercure. Quand la température s'élève, l'index de fer est poussé, et quand elle s'abaisse, il reste en place.

L'index du thermomètre à minimum est un cylindre d'émail, coulant librement, sans toucher les parois du tube. Si la température s'abaisse, le sommet de la colonne liquide emporte l'index, et quand ensuite elle s'élève, le liquide passe sans le toucher. Ces instrumens sont gradués à la manière ordinaire. On les tient dans une position verticale avant de les mettre en expériences.

631. La *température moyenne* d'un lieu, pendant un jour, est la moyenne des températures correspondantes à tous les instans dont ce jour se compose.

M. de Humboldt, par une discussion approfondie de nombreuses températures prises à Paris et à l'équateur, a reconnu que la demi-somme des températures *maximum* et *minimum* de chaque jour (celles de 2 heures après midi et du lever du soleil) ne diffère que peu de la moyenne rigoureuse et peut la remplacer.

La moyenne, calculée de cette manière, s'écarte d'autant plus de la vérité que le lieu est plus septentrional. Ainsi à Pétersbourg la moyenne, ainsi calculée, serait au-dessous de zéro, tandis que la moyenne véritable est de 3°,8.

La température maximum de la terre est à 2^h pour les jours les plus longs, et à 3^h pour les plus courts; tandis que l'action instantanée du soleil est à son maximum toujours à midi. L'instant qui précède le lever du soleil fournit la température minimum.

De plus, la température (du moins entre les parallèles 46° et 48°) du coucher du soleil est à peu près la température moyenne du jour. Enfin les températures d'octobre et d'avril fournissent sensiblement la température de l'année, comme le tableau ci-joint le fait voir.

Cependant il ne faut considérer ce résultat que comme approximatif. Ainsi à Paris, en 1822, la température du mois d'octobre a surpassé la moyenne d'un degré environ. Le tableau indique d'ailleurs un résultat analogue. Le mois d'octobre l'emporte toujours sur la moyenne de l'année.

La température de $8^h \frac{1}{2}$ du matin donne plus approximativement la moyenne de l'année.

LIEUX.	TEMPÉRATURE MOYENNE de l'année.	d'octobre.	d'avril.
Caire	22°,4	22°,4	25°,5
Alger	21,0	22,3	17,0
Natchez	18,9	20,2	19,1
Rome	15,8	16,7	13,0
Milan	13,2	14,5	13,1
Cincinnati	12,0	12,7	13,8
Philadelphie	11,9	12,2	12,0
New-Yorck	12,1	12,5	9,5
Pékin	12,6	13,0	15,9
Bude	10,6	11,3	9,5
Londres	11,0	11,3	9,9
Paris	10 6	10,7	9,0
Genève	9,6	9,6	7,6
Dublin	9,2	9,3	7,4
Edimbourg	8,8	9,0	8,3
Gottingue	8,3	8,4	6,9
Francecker	11,3	12,7	10,0
Copenhague	7,6	9,3	5,0
Stockholm	5,7	5,8	3,6
Christiana	5,9	4,0	5,9
Upsal	5,4	6,3	4,3
Quebec	5,5	6,0	4,2
Pétersbourg	3,8	3,9	2,8
Abo	5,2	5,0	4,9
Drontheim	4,4	4,0	1,3
Uléo	0,6	3,3	1,2
Uméo	0,7	3,2	1,1
Cap-Nord	0,0	0,0	— 1,0
Enontekies	— 2,8	— 2,5	— 3,0
Nain	— 3,1	+ 0,6	— 2,5

Les températures moyennes des années présentent beaucoup moins de différence qu'on serait tenté de le supposer d'après le témoignage des sens et des produits va-

riables de la culture. Les différences extrêmes atteignent à peine 2 à 3 degrés.

Les différences entre les moyennes de janvier s'élèvent à 7°; pour le mois d'août, elles ne vont que rarement à 4°.

Des lignes isothermes (1).

632. Pour tracer les lignes isothermes, on cherche les points du globe dont les températures moyennes se rapprochent le plus de 0°, 5°, 10° ou 15°. On reconnaît au premier abord si les lignes passent au sud ou au nord de tel ou tel endroit. Pour connaître la distance précise en latitude, on a recours aux méthodes ordinaires d'interpolation, en employant des tables analogues à la suivante.

A 1° de variation dans la température moyenne correspondent, dans différentes zones, les changemens de latitude suivans :

	Dans le nouveau continent par les longitudes 70° et 80° ouest.	Dans l'ancien continent, par les longitudes 2° à 17° est
entre 30° et 40° lat. nord.	1°,24′	2°,30′
40 et 50	1°, 6	1°,24
50 et 60	1°,18	1°,48

La figure 402 représente les lignes isothermes. La seule inspection de cette figure montre combien ces lignes diffèrent des parallèles, et que leurs sommets convexes en Europe sont presque toujours situés sur le même méridien.

Dans la zone torride, au-dessous du parallèle de 30°, les lignes isothermes deviennent peu à peu parallèles entre elles et à l'équateur terrestre.

633. A cette observation, faite depuis plus d'un siècle,

(1) M. de Humboldt, Société d'Arcueil, t. 3.

Lig. 10th. de	BANDE CISATLANTIQUE. (Long. 3° Oc., et 15° Or.)			BANDE TRANSATLANTIQUE. (Long. 60° Oc., 74° Or.)		
	TEMPÉRATURE moyenne de l'hiver.	TEMPÉRATURE moyenne de l'été.	Différence.	TEMPÉRATURE moyenne de l'hiver.	TEMPÉRATURE moyenne de l'été.	Différence.
20°	15°	27°	12°	12°	27°	15°
15	7	23	16	4	26	22
10	2	20	18	— 1	22	23
5	— 4	16	20	—10	19	29
0	—10	12	22	—17	13	30

Pour les températures moyennes du mois le plus chaud et du mois le plus froid, les différences seraient dans le même sens, et plus considérables encore.

635. *Table des températures extrêmes observées à Paris et dans d'autres lieux du globe.*

Paris.	Maximum du froid.		Paris.	Maximum de la chaleur.	
1665	5 février.....	— 21°,2	1706	8 août.....	+ 35° 3
1709	13 janvier.....	— 23, 1	1793	8 juillet.....	+ 38, 4
1776	29 janvier.....	— 19, 1	1800	18 août.....	+ 35, 5
1783	30 décembre..	— 19, 1	1808	15 juillet.....	+ 36, 2
1795	25 janvier.....	— 23, 5			
1820	11 janvier.....	— 14, 3			
1823	14 janvier.....	— 14, 6			

La moyenne de Paris est de 11°,2 environ.

Ces observations ont été faites avec des thermomètres placés au nord, à l'ombre, et, autant que possible, à l'abri des réverbérations du soleil. Les instrumens, couverts de noir de fumée et exposés à l'action directe du soleil, auraient marqué 8 à 10 degrés de plus.

Ce n'est pas là le maximum des températures des corps

placés à la surface de la terre. Le sable, la terre végétale peuvent marquer jusqu'à 65 et 70 degrés.

636. *Résultats observés par le capitaine Parry, en* 1819.

Milieu du détroit de Davis et de la baie de Baffin.

	maximum.	minimum.	moyenne.
Juillet	+ 7°,7	— 3°,3	+ 0°,9
Ile Melville.		Lat. nord, 74° ¼. Long. ouest, 113°.	
Décembre	— 14°,4	— 42°,8	— 29°,9
Février	— 27°,2	— 45°,6	— 35°,6
Août	+ 17°,2	— 5°,5	+ 5°,8

La moyenne des températures de l'île Melville est de — 18°,5, ce qui équivaut à peu près au plus haut degré de froid de notre climat. Aussi, le mercure y gèle-t-il naturellement à l'air libre, pendant cinq mois de l'année. (*Voyez* les notes scientifiques de M. Arago, Annuaire 1825.)

(*Voyez* plus loin la température du pôle nord.)

Températures des deux hémisphères.

637. L'hémisphère boréal, à parité de latitude, a une température moyenne plus élevée que celle de l'hémisphère austral; ce fait est bien constaté.

Les distances du soleil à la terre, aux solstices du cancer et du capricorne, sont dans le rapport des nombres 30 et 29. Le solstice du cancer correspond à l'été de l'hémisphère boréal et à l'hiver de l'hémisphère austral; c'est le contraire pour le solstice du capricorne. L'effet de

cette différence dans les distances du soleil à la terre est donc de rendre l'été moins chaud et l'hiver moins froid dans l'hémisphère boréal que dans l'hémisphère austral; et, comme la chaleur de l'été est supérieure à la chaleur de l'hiver, l'hémisphère boréal devrait donc être plus froid que l'hémisphère austral. L'observation est contraire à cette conséquence : il faut donc chercher une autre cause. Or la durée des saisons n'est pas la même dans les deux hémisphères; l'été boréal surpasse de huit jours l'été austral, et l'hiver boréal est plus court de huit jours que l'hiver austral. La chaleur de l'été est donc augmentée dans l'hémisphère boréal, et le froid de l'hiver diminué. A cette circonstance qui tend à augmenter la température de l'hémisphère boréal, il faut ajouter que, dans l'hémisphère austral, les mers sont très-étendues et que l'évaporation continuelle de l'eau contribue au refroidissement de l'air. Il est d'ailleurs bien constaté que les températures sont en général plus élevées dans l'hémisphère boréal, qu'on trouve déjà des glaçons dans l'hémisphère austral à des latitudes plus petites que celles où on les rencontre dans l'hémisphère boréal.

Températures du globe à diverses profondeurs.

638. La question des températures terrestres est fort composée; c'est à l'analyse seule qu'il appartient de la résoudre. Voici comment M. Fourier considère ce sujet :

« La chaleur qui se distribue dans l'intérieur de la terre est assujettie à trois mouvemens distincts :

1°. Les rayons du soleil pénètrent le globe et causent des variations diurnes et annuelles dans les températures. Ces changemens périodiques cessent d'être sensibles à

quelque distance de la surface. Au-delà d'une certaine profondeur, et jusqu'aux plus grandes distances accessibles, la température due à la seule influence du soleil est devenue fixe. Cette quantité immense de chaleur solaire, qui détermine les variations périodiques, oscille dans l'enveloppe extérieure de la terre; elle s'abaisse au-dessous de la surface pendant une partie de l'année, et, pendant la saison opposée, remonte et se dissipe dans l'espace.

2°. La température des lieux profonds, constante pour un lieu donné, est variable pour les points différemment situés par rapport à l'équateur, de sorte que la chaleur solaire pénètre d'abord les zones équinoxiales, et se dissipe à travers les régions polaires.

3°. Il ne suffit pas de considérer le foyer extérieur, il faut encore porter son attention sur le mouvement de la chaleur propre du globe. Si la température des lieux profonds, comme les expériences semblent l'annoncer, devient sensiblement plus grande à mesure qu'on s'éloigne de la surface, il est impossible d'attribuer cet accroissement à la chaleur du soleil. Il est dû entièrement à une chaleur primitive que la terre possédait à son origine, et qui diminue dans le cours des siècles en se dissipant à sa surface. »

Cette hypothèse d'une chaleur intérieure et centrale s'est renouvelée dans tous les temps, car elle se présente d'elle-même à l'esprit comme la cause naturelle de plusieurs grands phénomènes.

Les observations de M. Gensanne dans les mines de Giro-Magny, près de Béfort, de M. Daubuisson dans les mines de Freyberg, de M. de Humboldt dans ces dernières mines, et dans des mines d'Amérique, etc., etc., mon-

trent que l'accroissement est d'environ un degré par 30 à 40 mètres (1).

Cet accroissement ne sera pas toujours le même; il diminue progressivement, mais il s'écoulera un grand nombre de siècles avant qu'il soit réduit à la moitié de sa valeur (2).

Plusieurs physiciens présentaient des objections aux expériences précédentes; ils attribuaient l'élévation de température à la présence des ouvriers, des lampes, etc. M. Arago, pour lever ces difficultés, observa l'eau d'un puits artésien, et il reconnut qu'elle avait une température au-dessus de la moyenne de la surface. Des observations analogues ont été continuées, à l'invitation

---

(1) L'accroissement de la température ne peut être mis en doute; mais la science ne possède pas encore de données bien précises. (Voyez, à ce sujet, le mémoire que M. Cordier a lu récemment à l'Académie.) Ce mémoire renferme des observations nouvelles, et une discussion des observations anciennes. Meaux (Tarn) a fourni un degré d'accroissement pour 28 mètres de profondeur; Lettry (Calvados), le même accroissement pour 23 mètres; enfin à Decise (Nièvre), un degré correspond à 15 mètres. M. Cordier conclut de là que la valeur de l'accroissement des températures, à mesure qu'on pénètre plus avant dans la terre, n'est pas la même dans tous les points d'un même pays, et que la variation n'est pas en rapport avec la latitude. M. Cordier reproduit l'hypothèse d'un feu central, et pense que la majeure partie du globe est en liquéfaction. (*Voyez* les Mémoires du Muséum, année 1827.)

(2) M. de Laplace a trouvé par le calcul que la durée du jour n'a pas diminuée de $\frac{1}{100}$ depuis les observations astronomiques d'Hypparque, c'est-à-dire depuis environ deux mille ans. Ce qui montre que depuis ce long espace de temps les dimensions de la terre n'ont pas changé, ou que sa température n'a pas sensiblement varié. (*An. ch. et phy.*, t. 14, p. 410.)

Ainsi le refroidissement de la terre est à peu près à sa limite. *Voyez* un Mém. de M. Fourier, où cet académicien traite la question des températures terrestres dans toute son étendue. (*An. ch. et phy.*, t. 14.)

de ce savant académicien, par M. Bergere, officier du génie, et elles ont conduit à la même conséquence. Les objections précédentes ne sont plus applicables à ce procédé d'observation.

La température des lieux profonds (40 ou 50 mètres au-dessous de la surface) est constante pour un lieu déterminé (1), mais elle n'est pas la même dans les divers climats; elle décroît en général, lorsqu'on s'avance vers les pôles.

Les couches du globe, à une certaine profondeur, conservent une température qui n'éprouve pas de variation sensible d'une année à une autre, et qui est à peu près la température moyenne de la surface. Mais lorsque la profondeur est un peu considérable, la température s'élève; ainsi la température moyenne de Paris est au-dessous de 11°,7 (température des caves de l'Observatoire).

On s'exposerait à commettre des erreurs en prenant la température des sources pour la température moyenne de l'année, parce que ces sources peuvent être alimentées par les pluies, la fonte des neiges, etc. (2)

---

(1) Les variations extrêmes de température des caves de l'Observatoire (86 pieds de profondeur) n'ont pas surpassé $\frac{1}{100}$ de degré en 1824.

(2) Ainsi la source de Chaudes-Aigues a une température de 80°,25. M. Darcet a pris dernièrement la température des sources de la Dogne et de la Dore; il a trouvé pour la première, 4°,5; et pour la seconde, 2°,9.

Plusieurs sources de l'île de Ceylan marquent 41°,5 (J. Davy).

Dans les Cordilières, les sources d'Onoto marquent 44°,5; celles de Mariara, 64°. (MM. Boussingault et Mariano de Rivero, en 1822.) Cette dernière ne marquait, lors du voyage de M. de Humboldt, que 59°,2, à la même époque de l'année (commencement de février).

L'Islande présente une source fort remarquable. L'eau en sort boui-

Froid des lieux élevés.

639. La température de l'air décroît à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. D'après des observations de M. de Humboldt en Amérique, de Saussure et de M. Ramond dans les Alpes, une élévation de 190 mètres correspond à un degré d'abaissement.

Ce décroissement de température dépend de plusieurs causes. L'air, échauffé à la surface de la terre, s'élève, se dilate et se refroidit. Ce refroidissement est le résultat de l'accroissement de la capacité de l'air par la raréfaction, et d'un rayonnement plus libre à travers des couches d'air plus rare. La raréfaction entre pour une grande part dans le phénomène; si l'air conservait le même volume à toutes les pressions, le froid des montagnes serait beaucoup moindre.

Températures à différentes hauteurs.

hauteur.	Zone équatoriale de 0 à 10° latitude bor. et aust.	Zone tempérée de 45° à 47° latitude.
0 mètres	+ 27°,5	+ 12°,0
974	+ 21°,8	+ 5°,0
1949	+ 18°,4	— 0°,2
2923	+ 14°,3	— 4°,8
3900	+ 7°,0	»
4872	+ 1°,5	»

lante, et tient une quantité notable de silice en dissolution. La surface du globe offre une infinité de sources remarquables, que nous croyons inutile de mentionner.

La température élevée des eaux sulfureuses peut s'expliquer par la décomposition des sulfures, etc. Pour celle des eaux limpides, dépourvues de soufre, de fer, etc., on en a cherché la cause dans la haute température de l'intérieur du globe. Quant aux sources d'eau froide à 1, 2 et 3 degrés, leur formation est attribuée à la fonte des neiges.

Ces températures ont été déduites par M. de Humboldt d'un grand nombre d'observations. (*Voyez* le Mémoire de M. de Humboldt, *Ann. ch. et ph.*, t. 14, p. 5.)

Neiges perpétuelles.

640. Il est peu de phénomènes relatifs à la distribution de la chaleur sur le globe, qui soient plus compliqués ou, en d'autres termes, plus dépendans de la localité que le phénomène des neiges perpétuelles.

La courbe des neiges perpétuelles n'est pas une bande isotherme; elle n'indique ni le terme de la congélation, comme on l'a admis long-temps, ni une couche d'air d'égale température moyenne. Cette température moyenne de l'air est au Chimborazo, + 1°,5; au Saint-Gothard — 3°,7; dans la zone glaciale — 6°. La limite des neiges suit moins la trace des lignes isothermes de la plaine que les inflexions des lignes isothères (lignes d'égal été) (1). Elle dépend du partage de la chaleur annuelle entre les différentes saisons, de la longueur et de la température plus ou moins élevée des étés, du nombre des mois où la température est au-dessus de 4 à 5 degrés.

La limite des neiges perpétuelles descend beaucoup plus sur la pente méridionale de l'Himâlaya que sur la pente septentrionale, ce qui est dû à la forte chaleur des étés de

(1) Les lignes isothères s'écartent bien plus des parallèles géographiques, que les lignes isothermes. Par exemple, la température de l'été à Moscou, est à peu près la même que celle de l'été à l'embouchure de la Loire, quoiqu'il y ait entre les deux lieux une différence de 11° en latitude.

l'Asie et au rayonnement d'un plateau immense auquel ces montagnes sont adossées.

En Asie, la chaleur des étés augmente l'élévation de la couche des neiges perpétuelles jusque dans la chaîne du Caucase.

La limite inférieure des neiges, c'est-à-dire la courbe qui passe par la plus grande hauteur à laquelle les neiges se conservent pendant le cours d'une année, atteint en différentes saisons, dans chaque zone, un maximum d'élévation. La quantité de cette variation est l'oscillation annuelle de la limite inférieure des neiges. Sous l'équateur, l'oscillation de cette limite ne s'étend pas à plus de 30 mètres. A l'extrémité boréale de la zone torride, sous le 19e degré de latitude, elle atteint 750 mètres. A mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, le phénomène de l'oscillation annuelle des neiges devient moins régulier.

Tableau de la limite des neiges.

	Latitude.	Temp. moyenne à cette hauteur.	Hauteur.	
	0 20°	+ 1°,5	4791 m 4580	M. de Humboldt.
Caucase,	42° à 43°		3216	MM. Engelhart et Parrot.
Pyrénées,	42° ½ à 43°	— 3°,5	2729	M. Ramond.
Alpes,	45° ½ à 46° ½	— 4°,0	2550 1670	M. Saussure. M. Walhemberg.
Laponie,	62° 65°	— 6°,0	1750 950	M. de Buch.

Tout ce que nous venons de rapporter sur les neiges

perpétuelles, est tiré du Mémoire de M. de Humboldt, cité plus haut.

Température des mers.

641. La mer occupe une portion considérable de la surface du globe, puisqu'elle en fait plus des deux tiers. Des calculs approximatifs indiquent que, dans l'hémisphère septentrional, la terre est à la mer comme 419 à 1000, et dans l'hémisphère méridional, dans le rapport de 129 à 1000. Presque toute cette étendue d'eau est réunie en une seule masse qu'on nomme Océan et dont la plus grande partie se trouve dans l'hémisphère méridional.

La présence de l'eau à la surface de la terre a pour effet de rendre la distribution de la chaleur plus uniforme; dans l'Océan et dans les lacs, les molécules les plus denses se dirigent continuellement vers les régions inférieures, et les mouvemens de la chaleur dus à cette cause sont beaucoup plus rapides que ceux qui s'accomplissent dans les masses solides, en vertu de la faculté conductrice.

Une portion de la chaleur solaire qui arrive à la surface de l'eau, pénètre dans son intérieur, et s'y change en chaleur obscure.

642. Il résulte des observations de M. de Humboldt que, dans l'Océan atlantique, ainsi que dans le grand Océan, les eaux ne varient pas d'un degré de température sur une étendue de plusieurs milliers de lieues carrées, bien entendu à une grande distance des côtes.

Si le mouvement des eaux ne modifiait pas la température de l'Océan, l'accroissement de chaleur sous la zone torride serait énorme, parce que la surface de l'eau réfléchit d'autant moins abondamment les rayons de chaleur,

qu'ils s'approchent plus d'être perpendiculaires à sa surface.

Sous les différens méridiens, placés entre l'équateur et le 27e degré de latitude nord, la température est sensiblement constante: elle est assez variable dans les latitudes élevées, où la fonte des glaces polaires, les courans produits par cette fonte, et l'obliquité des rayons solaires, diminuent la température de l'Océan.

La température maximum des mers équinoxiales est, d'après les observations de plusieurs voyageurs, d'environ 29 degrés.

M. de Churrucca, en 1788, dans l'Océan atlantique 28°7
M. de Humboldt, en 1802, dans le grand Océan. . 29°3
M. Perrins, en 1804, dans l'Océan atlantique. . . 28°2
M. Rodman. . . . . *idem*. . . . . 28°8
M. Quevédo. . . . . *idem*. . . . . 28°6

M. de Humboldt avait conclu de ces observations, qu'en aucun lieu du monde, la température de l'Océan n'est supérieure à 30°; conséquence qui a été confirmée par toutes les observations ultérieures.

La température des mers décroît de l'équateur aux pôles. Vers le 50e degré de latitude, les bords des mers se gèlent; vers le 60e degré, les mers intérieures se couvrent de glace sur toute leur surface. A 70° les glaçons flottans deviennent très-fréquens, même sur l'Océan; enfin, vers 80°, on trouve des glaces fixes. Il est à peine nécessaire de faire remarquer que l'existence de ces glaçons dans une latitude déterminée, est soumise à l'influence des saisons, à la force et à la direction du vent, etc. (1).

(1) Voyez *Ann. ch. et ph.*, t. 5, p. 59, des détails fort remarquables

643. La détermination de la température de la mer est une opération fort délicate. Peron renfermait un thermomètre dans une enveloppe formée par diverses substances peu conductrices de la chaleur, et terminée par une masse de plomb considérable. Nous pensons que l'emploi d'un thermomètre fermé a des inconvéniens, et qu'il faudrait faire usage d'un thermomètre ouvert, semblable à celui que nous avons proposé pour la compression des liquides (*fig.* 403).

M. le capitaine Sabine a employé un thermomètre *à minima* pour la même détermination.

La figure 404 représente un instrument de ce genre, proposé par M. Gay-Lussac. Il se compose d'un ballon rempli d'eau, et dont le col n'offre qu'une légère ouverture; le col de ce ballon est scellé dans un tube rempli de mercure. Si l'eau se contracte par un abaissement de température, le mercure tombera; il en pénétrera d'autant plus dans le ballon, que la température aura été plus basse. Si l'extrémité supérieure du col du ballon est recourbée, on n'aura pas à craindre que le mercure tombe, même sans contraction de l'eau, mais seulement par l'agitation de l'appareil. A de grandes profondeurs il serait encore utile de connaître le volume de l'eau, afin de défalquer l'effet dû à la compression de ce liquide.

---

sur les glaces polaires, donnés par le capitaine Scoresby. Vous y verrez qu'on trouve dans le détroit de Davis, des montagnes de glace qui s'élèvent comme des tours hors de l'eau à plus de 100 pieds de hauteur, des champs de glace d'une étendue immense. Que souvent ces champs et ces montagnes se heurtent et produisent, en se pulvérisant mutuellement, un bruit épouvantable, etc.

644. La température des mers décroît à mesure qu'on s'enfonce davantage, et le décroissement est beaucoup plus rapide que dans l'air. Péron avait cru même pouvoir en conclure que le fond des mers devait être congelé. Cette dernière opinion est tout-à-fait erronée; car la glace, plus légère que l'eau, monterait à la surface.

L'eau la plus froide étant la plus pesante (du moins jusqu'à + 4°), tombe et refroidit les couches inférieures. Voilà la principale cause de l'abaissement de la température.

Dans les grandes masses d'eau alimentées par la fonte des neiges, la température du fond doit être environ de + 4°, puisque c'est là le maximum de densité. En effet Saussure a trouvé 4°, 2 et 6°, 9 pour les températures des parties inférieures de plusieurs lacs de la Suisse.

On conçoit encore pourquoi la température du fond des mers des régions polaires, couvertes d'énormes glaçons, est de + 4° environ; c'est là aussi à peu près la température du fond de l'Océan dans les régions tempérées (Ellis et Forster). De ce dernier fait M. de Humboldt a conclu l'existence d'un *courant sous-marin*, dont la direction est du pôle à l'équateur.

Il a encore été constaté que, sur un banc, l'eau est plus froide qu'en pleine mer, et que la différence est d'autant plus grande, que le banc est moins abaissé au-dessus de la surface du liquide. Cette circonstance mérite toute l'attention du navigateur de profession; elle peut l'avertir de l'existence d'un banc de sable, etc. (Dr Francklin, M. J. Williams, John Davy.) L'explication la plus satisfaisante de ce résultat est celle qu'a donnée M. de Humboldt. Il attribue

le froid des hauts fonds au mélange des eaux froides inférieures et supérieures.

Il paraît bien établi que sous l'équateur, la température de la mer est supérieure à celle de l'air. Sous les latitudes élevées, c'est le contraire.

645. Si les observations de M. John Davy sont confirmées, la température de la surface de l'Océan est sujette à une variation diurne; elle parvient au maximum environ vers trois heures après midi, et au minimum au lever du soleil.

Sur la température moyenne du pôle nord.

646. Il n'existe pas d'observation directe, propre à faire connaître la température du pôle, puisque les navigateurs ne se sont avancés que jusqu'au 82e degré de latitude. Néanmoins peut-être est-il permis de conclure, avec une certaine approximation, la température moyenne du pôle.

Si l'on suppose que le nouveau monde se prolonge jusqu'au pôle nord, soit d'une manière continue, soit par un archipel formé d'îles fort rapprochées, il faudra employer le petit tableau suivant qui a été formé d'après des expériences faites sur le méridien américain :

	Latitude.	Température moy.
Cumberland-Housse. . . .	54°	— 0°,5 centig.
Nain.	57 $\frac{1}{7}$	— 3,0
Fort-Entreprise.	64 $\frac{1}{2}$	— 9,2
Winter-Island.	66 $\frac{1}{3}$	— 12,5
Ingloolik-Island.	69 $\frac{1}{2}$	— 15,9
Melville-Island.	75	— 18,5

En admettant que la loi de ces nombres, qui est assez régulière, se suive depuis 75° jusqu'à 90, on en déduit — 32° pour la température moyenne du pôle.

Si, au contraire, l'Océan se prolonge jusqu'au pôle, il faudra avoir recours à d'autres élémens.

	Latitude.	Températ. moy.
Edimburg.	55°57'	+ 8°4 centig.
Christiania.	59,55	+ 4,9
Eyafjord (Islande).	66 ½	+ 0,6
En mer (sous le méridien de Londres).	76,45	— 7,5
En mer (*idem*).	78	— 8,3

ce qui conduit à — 18° pour la température du pôle.

La moyenne—25° de ces deux résultats ne doit pas s'éloigner beaucoup de la vérité. (*M. Arago, Annuaire*, 1825.)

SOURCES DE CHALEUR.

647. Dans la seconde partie de l'ouvrage (n° 57) nous avons donné un abrégé des principaux faits dont se compose l'histoire de la chaleur. Pour compléter tout ce qui a rapport à cette partie importante de la physique, il reste à faire connaître les différentes sources de chaleur.

Des rayons solaires.

648. La principale source de chaleur est le soleil. Cet astre remplit tout l'univers de sa chaleur bienfaisante; les rayons caloriques qui en émanent, traversent tous les espaces, et vont échauffer tous les corps contenus dans l'immensité.

Une partie quelconque du globe manifeste une température d'autant plus élevée, qu'elle est dans une situation plus propre à recevoir la chaleur solaire. C'est ainsi qu'un lieu est d'autant plus échauffé, qu'il est plus rapproché de l'équateur.

La température du globe s'abaisse aussitôt que, par une circonstance quelconque, il est dérobé à l'action directe du soleil; cet abaissement, qui est de quelques degrés en peu de jours, serait bien plus considérable, si l'atmosphère et les nuages n'arrêtaient et ne renvoyaient la chaleur émise par la terre, si la lune, si les autres corps du système planétaire ne remplaçaient en partie le rayonnement du soleil; et malgré ces causes compensatrices, il n'est pas douteux que la terre ne présentât bientôt qu'une masse solide, si elle était privée totalement de la chaleur du soleil.

649. L'effet calorifique, produit par les rayons solaires, peut être augmenté. Le procédé consiste à affaiblir la perte causée par le rayonnement du corps échauffé. Voici l'appareil employé par Saussure.

Cet appareil consiste en une caisse en bois, couverte d'une ou de plusieurs lames de verre bien transparent, placées à quelque distance les unes des autres. L'intérieur de la caisse est couvert de noir de fumée; l'air échauffé est contenu de toutes parts, soit dans l'intérieur de la caisse, soit dans chaque intervalle compris entre les deux lames; des thermomètres, placés dans la caisse et dans les intervalles, marquent le degré de chaleur acquise par chacune de ces capacités. Cet appareil a été exposé au soleil vers l'heure de midi, et l'on a vu le thermomètre placé dans le fond de la caisse monter jusqu'à 140 degrés. Les

thermomètres, placés dans les intervalles, ont acquis des températures d'autant moindres qu'ils étaient plus éloignés du fond.

La théorie de cet appareil est fort simple. D'une part la chaleur acquise se concentre, parce qu'elle n'est pas immédiatement dissipée par le renouvellement de l'air; de l'autre la chaleur, émanée du soleil, traverse le verre avec facilité (n° 61), et se change dans l'appareil en chaleur obscure qui ne jouit plus sensiblement de cette propriété.

Cette expérience met en évidence l'influence de la présence de l'atmosphère sur l'état thermométrique du globe, et justifie l'usage des doubles croisées pour augmenter la chaleur des appartemens.

De la percussion.

650. Une barre de métal, soumise à quelques coups de marteaux, s'échauffe au point de déterminer l'inflammation du phosphore à l'air.

L'air, l'oxygène et le chlore dégagent, par la percussion, une lumière assez vive pour être aperçue au milieu de la clarté du jour. Il est hors de doute qu'il doit en être de même des autres gaz.

L'usage du briquet pneumatique est fondé sur la propriété qu'a l'air de dégager, par une compression subite, assez de chaleur pour enflammer l'amadou.

Il résulte des expériences de Mongolfier qu'une pièce de canon, ancienne ou nouvelle, s'échauffe beaucoup plus par une décharge, qu'elle ne le ferait si on la remplissait de charbons incandescens, et qu'on les y laissât pendant un temps dix fois plus long que celui de la décharge.

Le fait du dégagement de la chaleur dans le choc des corps, et particulièrement dans la dernière expérience, paraît plus favorable à l'hypothèse qui regarde la chaleur comme étant le résultat des vibrations de l'éther, qu'à celle qui la considère comme une matière.

Du frottement.

651. Le frottement produit des effets analogues à ceux que produit la percussion ou le choc.

Une lame d'acier, par son frottement sur une planche couverte de sable, donne assez de chaleur pour ne pouvoir plus être touchée impunément. Le frottement rapide des roues contre les essieux, détermine souvent leur inflammation mutuelle. Les sauvages se procurent du feu en frottant avec force, l'un contre l'autre, deux morceaux de bois sec. Dans le briquet ordinaire, le frottement d'une pierre dure (silex) détache de l'acier des parcelles de fer qui s'embrasent dans l'air; ces parcelles d'oxide reçues incandescentes sur l'amadou, la poudre, etc., en déterminent la combustion.

Voici une expérience importante du comte de Rumfort sur la chaleur produite par le frottement. Ce physicien a fait mouvoir avec rapidité un foret obtus dans un cylindre de bronze du poids de 13 livres, et il a observé que le foret avait dans l'espace de deux heures, par une pression équivalente à cent quintaux, réduit en poudre 4115 grains de bronze, et qu'il s'était dégagé une quantité de chaleur capable d'amener 26,38 livres d'eau de la température de la congélation à celle de l'ébullition. La chaleur spécifique de la poudre détachée était la même que celle

du bronze qui n'avait pas subi de frottement. L'explication de cette expérience ne paraît pas facile dans la théorie ordinaire du calorique. (*Mém. sur la chal.*, p. 29.)

Sir Humphry Davy a fait une autre expérience qui vient à l'appui de la conclusion de l'expérience précédente : par le frottement mutuel de deux morceaux de glace, il est parvenu à en fondre une quantité considérable.

Changement d'état.

652. Le passage d'un corps de l'état de vapeur à l'état liquide, ou de l'état liquide à l'état solide, dégage de la chaleur. Voyez ce que nous avons dit à ce sujet dans le n° 79.

De l'électricité.

653. Nous nous sommes déjà occupés de ce sujet, (n° 353, expérience de sir Humphry Davy, sur la chaleur et la lumière dégagées dans la réunion des deux électricités, et n° 347, sur les effets mécaniques de l'électricité.)

Des combinaisons.

654. Les combinaisons chimiques sont une source puissante de chaleur; dans toutes les combinaisons, en général, il y a dégagement de chaleur et souvent dégagement de lumière.

Exemple :

4 *p.* acide sulfurique. 1 *p.* eau.	La température du mélange augmente jusqu'à plus de cent degrés.

La potasse, la soude, dégagent par leur union avec les acides sulfurique, nitrique, etc., des quantités de chaleur considérables; mais, en général, dans les combinaisons qui se font avec le contact de l'eau, l'évaporation de ce liquide absorbe la majeure partie de la chaleur, et la température du mélange ne s'élève pas assez pour le rendre lumineux.

Voici quelques exemples dans lesquels il y a dégagement de lumière et de chaleur.

2 *p.* cuivre.

1 *p.* soufre.

On expose d'abord le mélange à l'action d'un foyer, afin de fondre le soufre; bientôt la combinaison s'opère: elle se continue sans le secours d'aucune chaleur étrangère, et le dégagement de lumière est tel que l'œil peut à peine en soutenir l'éclat.

Le plomb, le fer, le zinc, et beaucoup d'autres métaux se comportent comme le cuivre.

On obtient encore des résultats analogues en remplaçant le soufre par le phosphore.

L'état des corps, leur affinité mutuelle, suffisent quelquefois pour déterminer leur combinaison à la température ordinaire, avec dégagement de chaleur et de lumière. C'est ainsi que le potassium, l'antimoine et le bismuth, très-divisés, s'enflamment dans le chlore gazeux.

C'est à la combinaison de l'oxygène de l'air avec le carbone et l'hydrogène du charbon et de la houille, que nous devons la chaleur de nos foyers.

C'est une combinaison pareille qui entretient la température des animaux au-dessus de la température des corps qui les environnent.

655. Les expériences suivantes se trouvent naturellement placées après les combinaisons.

Tous les corps solides exercent une certaine action sur l'eau, et sur les autres liquides.

Déja une expérience de M. Leslie avait appris que, lorsqu'on mouille le linge dont est entourée la boule d'un thermomètre, la température de cet instrument s'élève d'une manière sensible.

M. Pouillet vient de faire un grand nombre d'expériences, desquelles il résulte que, toutes les fois qu'on verse un liquide sur un corps solide quelconque, réduit en poudre ou en petits fragmens, la température du mélange s'élève d'une quantité notable.

Le verre, les métaux, les oxides mouillés par l'eau, par l'alcool, par l'acide nitrique, et par l'huile, dégagent en général 0°,25 de chaleur.

Les substances organiques, dont la pulvérisation est beaucoup plus complète, dégagent de 1 à 10°.

Dans ces diverses expériences, le dégagement de chaleur est toujours très-faible, parce que l'action du liquide ne s'exerce que sur un petit nombre de points, et, parce que, d'une autre part, les combinaisons formées sont très-peu stables.

De la combustion.

656. Quoique la combustion soit un phénomène chimique, cependant il ne sera pas sans utilité de placer, même dans un ouvrage élémentaire de physique, quelques détails sur les applications importantes auxquelles elle a donné lieu.

Dans la théorie de Stalh, tous les corps possédaient un

principe d'inflammation auquel il avait donné le nom de phlogistique; un corps en combustion perdait son phlogistique; chauffé ensuite avec du charbon, il le reprenait. Cette théorie est évidemment erronée, puisqu'un corps quelconque qui brûle, augmente dans son poids. Ainsi 100^{gr} de fer en fils ou en lames minces, chauffés avec le contact de l'air, brûlent et fournissent plus de 130^{gr} d'oxide.

C'est à notre illustre Lavoisier qu'appartient la gloire d'avoir renversé la théorie du phlogistique, et d'avoir établi par des expériences nombreuses, la théorie de la combustion, telle qu'elle est admise aujourd'hui, par tous les physiciens et tous les chimistes.

La combustion est un phénomène dans lequel le gaz oxygène se fixe sur un corps. Il faut dire de la combustion ce qui a été dit des combinaisons en général. Tantôt elle se fait sans dégagement de lumière et même sans dégagement de chaleur apparente; c'est le cas du phosphore, du fer exposés à une température basse, au contact de l'air: tantôt il y a dégagement de chaleur et de lumière; c'est ainsi que le phosphore et même le fer brûlent dans l'air et dans l'oxygène pur, quand ils ont été préalablement portés chacun à une température convenable. Ces deux espèces de combustion ont été appelées, la première, combustion *lente*, et la seconde, combustition *vive*.

Lavoisier et beaucoup de physiciens, après lui, ont expliqué la chaleur dégagée dans les combinaisons par le rapprochement des molécules. Cette explication ne convient pas à tous les cas : par exemple, dans la combustion du carbone par l'oxygène, il n'y a pas condensation, et même, au contraire, le carbone passe de l'état solide à l'état de gaz. Cependant la chaleur dégagée est très-considéra-

ble. Plusieurs physiciens ne pouvant croire à l'infaillibilité de l'explication admise généralement, pensèrent que la chaleur spécifique du gaz acide carbonique était moindre que celle de ses élémens, et que la différence produisait le dégagement de chaleur; mais cette différence, d'après les expériences, est très-petite.

De ces faits et d'autres analogues, MM. Davy et Berzelius ont conclu qu'il fallait chercher au dégagement de chaleur dans les combinaisons, une autre origine que celle qu'on lui avait assignée jusqu'alors. Cette opinion est encore fortifiée par des expériences récentes de MM. Dulong et Petit, desquelles il suit que, dans le plus grand nombre de cas, la perte de chaleur dans le moment où s'opère une combinaison, n'est suivie d'aucune diminution dans la capacité des composés qui en résultent.

Quelle origine faut-il donc attribuer à cette grande élévation de température qui se manifeste dans la plupart des combinaisons? Beaucoup de physiciens pensent aujourd'hui, avec MM. Davy et Berzelius, qu'elle est le résultat de la réunion des deux électricités. (*Voyez* le n° 376.)

M. Berzelius ne se dissimule pas une difficulté. Les phénomènes électriques ordinaires, dit ce savant célèbre, expliquent bien l'action des corps à plus ou moins de distance, leur attraction avant la combinaison, et le feu produit par cette combinaison; mais ils ne nous éclairent pas sur la cause de l'union permanente. Est-ce l'effet d'une force particulière, comme la polarisation électrique, ou est-ce une propriété de l'électricité qui n'est pas sensible dans les phénomènes ordinaires? La solution de cette difficulté se trouve dans la manière dont M. Ampère con-

sidère l'action des molécules des corps en admettant que chaque molécule renferme une certaine quantité d'électricité positive ou négative qui lui est inhérente. Cette électricité décompose le fluide environnant, de manière que chaque molécule se trouve dans l'état d'une bouteille de Leyde (n° 376).

Cette ingénieuse hypothèse rend raison de l'union permanente de deux molécules chargées d'électricités différentes; mais comment concevoir la même permanence entre deux molécules qui possèdent une électricité de même nature?

657. En général, l'élévation de température favorise la combustion d'un corps; chaque corps en particulier exige une température particulière. Ainsi le phosphore brûle avec vivacité à 45 degrés, le soufre à 140, le fer à plus de 500 degrés, etc.

Ces nombres se rapportent à la combustion vive; mais la combustion peut s'opérer à des températures différentes : le phosphore, le fer, se combinent avec l'oxygène, même à la température de la glace; l'hydrogène brûle à une chaleur obscure; le bois en copeaux, dans un four dont la température est inférieure à celle de l'ignition, disparaît sans production de lumière.

Nous mettrons ici un tableau représentant la chaleur dégagée par un même poids de plusieurs corps.

Tableau de la chaleur produite par la combustion d'un kilogramme de diverses substances.

COMBUSTIBLES.			KILOGRAMME de glace fondue.	THERMES.
Gaz hydrogène pur.			295	22125
Huile d'olive suiv. Laplace	11116	moyenne.	134	10080
Idem. Rumford	9044			
Huile de colza épurée.			124	9307
Huile blanche suivant les mêmes.	10500	moyenne.	133	9990
	9479			
Suif, *idem.*	7186	moyenne.	104	7777
	8369			
Phosphore.			100	7500
Naphte, poids spécifique 0,829 à 13°,02.			98	7338
Ether sulfurique. 0,728 à 20°.			107	8030
Charbon de bois.			94	7050
Coke pur.			94	7050
Coke donnant 0,1 de cendre.			84,6	6345
Houille, 1re qualité donn. 0,1 de cend.			94	7050
Idem, 2° 0,1.			84,6	6345
Idem, 3° 0,2.			76,1	5932
Bois sec quelconque.			48,88	3666
Bois contenant 0,2 d'eau.			38,41	2945
Tourbe bonne.			26,66	2000
Idem mauvaise.			15	1125
Alcool à 42°.			82	6195
Idem à 33°.			70	5261

Tous ces nombres sont trop faibles, du moins si nous les comparons aux nombres fournis par nos expériences. Ainsi pour le carbone nous avons trouvé 7914° au lieu de 7050. Ceux des autres corps inscrits dans le tableau, et que nous avons soumis à nos expériences, ont donné une semblable différence.

De la Flamme.

658. Le but que nous nous proposons dans cet article

sur la flamme est de faire connaître la lampe des mineurs, imaginée par sir Humphry Davy.

La flamme est un gaz en combustion; il n'y a que les gaz et les corps volatiles qui brûlent avec flamme.

La température d'une flamme est beaucoup plus élevée à la surface extérieure qu'au centre. Par exemple, on a porté de la poudre dans l'intérieur de la flamme d'une bougie sans qu'elle s'enflammât.

La présence d'une matière solide rend la flamme plus brillante; ainsi, si l'on y porte un peu d'amianthe ou un peu de sable, elle devient beaucoup plus vive; c'est ce qui fait que la lumière du gaz hydrogène carboné est beaucoup plus brillante que celle du gaz hydrogène pur; c'est encore à cette circonstance qu'est dû l'éclat de la lumière dégagée par le zinc, le phosphore et le fer en combustion.

659. La flamme s'éteint si l'on abaisse sa température. On s'en assure en portant dans la flamme d'une bougie un corps d'une certaine dimension, par exemple, une clef; aussitôt la combustion de la matière de la flamme s'arrête, et une quantité considérable de fumée est emportée par le gaz.

On conçoit, d'après cela, l'action d'une toile métallique sur une flamme; une toile de ce genre, portée dans une flamme, pourra l'arrêter, si la matière de la flamme, par son passage à travers la toile, se refroidit assez pour se trouver au-dessous de la température à laquelle elle brûle à l'air. Il est clair que l'effet d'une toile doit être proportionnel à la masse du métal, à sa capacité pour la chaleur, etc.

De plus, un gaz exige une toile d'autant plus serrée, qu'il dégage plus de chaleur dans sa combustion.

Enfin, une flamme passera d'autant plus aisément à travers une toile, qu'il faudra moins de chaleur à la matière dont elle est formée, pour brûler. C'est ainsi que le gaz protophosphoré passe à travers une toile qui arrête le gaz hydrogène pur, et que le gaz hydrogène pur n'est pas arrêté par la toile qui arrête complétement le gaz hydrogène carboné.

Il est encore évident que si d'avance la toile avait la même température que la flamme, son action sur elle serait nulle, ce qui est vérifié par l'expérience. Voilà pourquoi une flamme qui est arrêtée d'abord par une toile métallique finit par la traverser sans s'éteindre, lorsqu'elle en a élevé convenablement la température. Il sera facile, d'après ce qui précède, de concevoir la construction de la lampe de sûreté.

668. On sait que dans l'intérieur des mines de houille, il se dégage du gaz carboné; ce gaz se mêle avec l'air. Lorsque ces deux gaz sont en proportion convenable, ils détonnent par l'approche d'une bougie et causent souvent la mort des ouvriers.

Sir H. Davy a imaginé d'envelopper d'une toile métallique la lumière destinée à éclairer les ouvriers. La toile qu'emploie sir H. Davy contient 750 ouvertures par pouce carré; le fil de fer ou de laiton a $\frac{1}{59}$ environ de pouce de diamètre; l'enveloppe de toile métallique n'a pas plus de deux pouces de diamètre; elle est vissée sur la boîte qui renferme l'huile.

En supposant qu'il se développe dans une mine du gaz

carboné, et qu'il pénètre dans l'intérieur de la lampe, il peut y faire explosion; mais, comme la flamme s'éteint par son passage à travers la toile, l'inflammation ne se communique pas au gaz extérieur.

Une semblable lampe peut être plongée dans un mélange d'air et de gaz inflammable, sans en déterminer la détonnation.

661. Sir H. Davy a encore fait une remarque dont il a tiré un parti très-avantageux : voici en quoi elle consiste. Un fil de platine plongé chaud dans un mélange explosif d'oxygène et d'hydrogène, d'air et d'éther sulfurique, etc., rougit, et le mélange se consume peu à peu. Guidé par ce résultat, sir H. Davy a placé au-dessus de la flamme de la lampe de sûreté un fil de platine, de sorte que lorsque cette lampe sera plongée dans un mélange explosif, elle s'éteindra, le fil de platine restera rouge, et l'ouvrier, averti du danger, aura le temps de se retirer.

662. Nous dirons un mot des chalumeaux Le plus simple est formé par une vessie remplie d'oxygène pur. A cette vessie est adapté un tube. On presse la vessie, on dirige le courant d'oxygène sur un charbon enflammé, et l'on obtient une température à laquelle résistent peu de corps.

On obtient des effets beaucoup plus grands en comprimant le gaz oxygène dans une caisse en cuivre à l'aide d'un corps de pompe analogue à celui de la machine de compression (n° 248). La figure 405 le représente. *A B* est le corps de pompe; *C D* est la caisse; *E* est la vessie remplie d'oxygène; *P* est le tuyau de laiton par lequel le gaz s'échappe. Ce tuyau est à charnière, ce qui donne la

facilité de donner au courant du gaz la direction qu'on désire.

On augmente encore beaucoup la puissance de ce dernier chalumeau en y condensant un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans le rapport de 2 à 1.

Dans la partie inférieure de la caisse est une couche d'huile à brûler *H K*. Par la pression du gaz, une certaine quantité de cette huile monte dans le tuyau *I L*, et se trouve ainsi au-dessus du niveau. Cette huile est destinée à intercepter toute communication entre le gaz du conduit *I L*, et le gaz de l'intérieur. La partie inférieure du cylindre *I L* porte une virole garnie de toiles métalliques. La partie supérieure *P* en porte également une qui est garnie de plus de cent toiles métalliques; l'épaisseur de cette masse de toiles est de 25 millimètres.

Ces toiles sont évidemment destinées à empêcher l'explosion dans l'intérieur. Quand on veut faire fondre quelque substance, on enflamme le gaz à sa sortie, et on expose à la flamme la substance à fondre. La température est tellement élevée, qu'il y a peu de corps qui y soient exposés sans fondre. Le platine, la chaux, la barite, y fondent en quelques secondes.

663. M. Dœbereiner a découvert, en 1823, que le platine en éponge détermine la combustion du gaz hydrogène mêlé à l'air ou à l'oxygène. Il a reconnu la même propriété dans le platine divisé, dans le nickel... M. Dœbereiner pense que le gaz et le métal dans leur contact se chargent, le premier d'électricité positive, et le second d'électricité négative.

MM. Thénard et Dulong, peu de temps après que ce fait curieux fut connu en France, le soumirent à un exa-

men approfondi. Le résultat de leurs recherches est que :

Le palladium, le rhodium, l'iridium se comportent comme le platine;

Que d'autres métaux ont besoin d'être portés préalablement à des températures plus ou moins élevées, l'osmium à 45°, l'or (en poudre) à 120°. Cette propriété n'appartient pas seulement aux métaux, mais encore à beaucoup d'autres substances. Le charbon, le verre, la pierre-ponce, la porcelaine, la possèdent à des températures moindres que 250 degrés.

L'état de division, la configuration des corps, ont une influence plus ou moins marquée. Ainsi l'or en lames ne détermine l'enflammation qu'à 280°, tandis qu'en poudre il la détermine à 120°.

L'éponge et les fils de platine, etc., perdent leur propriété par une exposition à l'air; on la leur rend par la calcination.

Plusieurs de ces effets ont de l'analogie avec l'expérience de sir H. Davy, dans laquelle il a déterminé la combustion lente de l'hydrogène par l'oxygène à une chaleur obscure. Ils font aussi mieux concevoir la manière d'agir du fil de platine dans la lampe de sûreté (n° 659).

Il y a peut-être aussi quelque rapport entre ces effets et ceux que M. Thénard a découverts relativement à l'action de l'ammoniaque sur plusieurs métaux.

Du Froid.

662. Les n°s 85 et 86 ont été consacrés à exposer les différens moyens de produire du froid par les changemens d'état.

Nous n'avons donc qu'à parler du froid produit dans la dilatation. Il paraît évident que, dans la dilatation, un corps doit absorber toute la chaleur dégagée dans la condensation. Il est assez difficile de constater le froid par la dilatation des solides et des liquides. L'expérience relative aux gaz est au contraire fort simple. Condensez l'air dans une fontaine à compression, offrez-lui ensuite une issue, et, à peu de distance de cette issue, placez une boule de verre creuse ou tout autre corps de peu de masse; le froid, produit par la dilatation de l'air, sera suffisant pour opérer la congélation de la vapeur qu'il renferme. Cette vapeur se déposera à l'état de glace sur la boule de verre. Il est clair que le froid de la dilatation peut être porté d'autant plus loin, que la compression primitive est plus grande.

665. C'est ici le lieu de rapporter quelques expériences sur le vide.

D'abord, existe-t-il une chaleur propre au vide? L'analogie porte à croire que le vide ne doit contenir que la chaleur rayonnante, émise par les corps environnans, et qui conséquemment ne fait qu'y passer.

M. Gay-Lussac a en effet reconnu que la température d'un espace n'éprouve aucune variation soit par la diminution, soit par l'agrandissement de son volume.

666. Voici une autre expérience qui se trouve naturellement placée ici.

Quand on laisse rentrer l'air dans un espace vide, un thermomètre qui s'y trouve plongé et qui a acquis une température fixe, annonce, au moment de l'entrée de l'air dans le vide, une élévation de température. On explique

ce fait en disant que les premières portions d'air sont comprimées par les suivantes et ainsi de suite.

L'expérience peut être faite de manière à produire tout à la fois de la chaleur et du froid. Réunissez deux ballons par un tube de communication; dans l'un faites le vide; laissez l'autre plein d'air; fermez-les tous les deux. Quand vous ouvrirez le robinet qui interceptait la communication entre ces deux ballons, le thermomètre placé dans le ballon vide s'élèvera, tandis que celui qui est placé dans le ballon d'où l'air se dégage, s'abaissera.

SOURCES DE LA CHALEUR ANIMALE.

667. Parmi les phénomènes que présente l'étude de la physique générale, aucun n'est plus capable d'exciter l'attention que cette propriété singulière dont l'homme et les animaux à sang chaud jouissent, de conserver une température à peu près constante, pendant que le milieu dans lequel ils sont plongés subit des variations continuelles. La chaleur, dans tous les corps bruts, tend sans cesse vers l'équilibre; les échanges réciproques établis entre ces différens corps amènent bientôt une température uniforme. Au contraire, les animaux à sang chaud, également soumis aux pertes occasionées par le contact, l'évaporation et le rayonnement, possèdent en eux une cause de reproduction de chaleur qui maintient en général leur température entre 35 et 45° au-dessus de celle de la glace fondante.

Le tableau ci-joint donnera une idée suffisante des différentes températures. La température de l'air = 15°,15.

	Température moyenne.
Neuf hommes âgés de 30 ans. .	37°,14
Quatre hommes de 66 ans. . .	37,13 (1)
Quatre jeunes gens de 18 ans.	36,99

(1) Nous avons trouvé une température sensiblement égale chez des vieillards âgés de plus de 90 ans.

	Température moyenne.
Trois enfans mâles âgés de 1 à 2 jours.	35,06
Deux corbeaux adultes.	42,91
Quatre chats-huans volant bien.	40,91
Une chouette adulte.	41,47
Un tiercelet adulte.	41,47
Trois pigeons.	42,98
Trois moineaux francs bien couverts de plumes.	39,08
Un moineau complétement élevé.	41,67
Un moineau adulte.	41,96
Bruant adulte.	42,88
Deux corneilles commençant à manger seules.	41,17
Chien de 3 mois.	39,48
Chat mâle adulte.	39,78
Cochon d'Inde adulte.	35,76
Deux carpes.	11,69
Deux tanches.	11,54
Eau dans laquelle ces poissons vivaient.	10,83

Ce tableau montre, 1° que les oiseaux ont une température plus élevée que celle de l'homme et des animaux mammifères.

2°. Que l'homme a en général une température plus petite que celle des mammifères.

3°. Que l'homme adulte a une température plus élevée que celle des enfans. Il en est de même des animaux adultes comparés aux jeunes animaux.

4°. Que les poissons ont une température plus élevée que celle de l'eau dans laquelle ils vivent.

Nous ajouterons que des expériences, répétées plusieurs fois, nous ont donné une température un peu plus élevée en été qu'en hiver.

M. John Davy a pris les températures d'un nombre considérable d'animaux (lièvre, tigre, cheval, bœuf, etc.); les résultats sont rapportés dans l'Annuaire (1827). On voit par le tableau des expériences du savant anglais que le porc a une température de 40,5, la plus élevée qu'on connaisse chez les animaux mammifères.

M. John Davy a trouvé de plus, 1° que les hommes de différentes races ont à peu près la même température; 2° que la température de l'homme s'accroît un peu quand il passe d'un pays froid, ou même tempéré, dans un pays chaud; 3° que les insectes ont une température très-peu au-dessus de la température de l'air dans lequel ils sont plongés.

668. Il est naturel de chercher la source de la chaleur animale dans la respiration, puisque les observations apprennent que la température d'un animal est d'autant plus élevée que sa respiration est plus active.

Il a été de tout temps reconnu que l'air est de nécessité absolue pour l'entretien de la vie des animaux, et qu'aucun animal ne peut respirer qu'un temps limité une même quantité d'air. Les travaux de Mayow, de Black, de Schéele, de Lavoisier, de Priestley, de Séguin, etc., sont rapportés dans tous les ouvrages de physique et de chimie.

Tous les physiciens reconnaissent qu'une portion de l'oxygène de l'air est employée à former de l'acide car-

bonique par la combustion du carbone du sang veineux.

Peu de physiciens ont pensé que le volume d'acide carbonique, plus l'oxygène restant, représente tout l'oxygène de l'air après la respiration (Dalton, Tomson).

En général, on admet qu'il y a disparition d'une portion d'oxygène; M. Davy porte la diminution à $\frac{1}{55}$; MM. Hallen et Pepys à $\frac{1}{120}$; Bostoch à $\frac{1}{80}$ (1). Crawford et Lavoisier ont reconnu la disparition d'une portion d'oxygène. Quelques expériences de M. Gay-Lussac sur les oiseaux, les nombreuses recherches de MM. Humboldt et Provençal sur la respiration des poissons donnent également une absorption d'oxygène manifeste, et il est probable que la disparition d'une certaine quantité d'oxygène dans le contact de l'air et du sang est une condition aussi nécessaire à la vie de tous les êtres qui respirent, que celle de la formation de l'acide carbonique. A la vérité, d'après Spallanzani et Schéele, l'acide carbonique formé dans la respiration des insectes, ajouté à l'oxygène restant, représenterait tout l'oxygène de l'air. Mais nous sommes portés à croire que ce résultat n'est pas conforme à la vérité.

La disparition d'oxygène est assez considérable pour qu'en général on puisse la rendre manifeste en plaçant un animal dans une cloche, et en y adaptant un tube qu'on fait plonger dans l'eau : à peine l'animal est-il renfermé, qu'on voit l'eau monter dans le tube, ce qui indique une diminution de volume. La diminution serait bien

(1) Ces différens nombres ne sont relatifs qu'aux expériences qui les ont fournis; car la disparition dépend de l'âge, de l'espèce de l'animal, de la durée de l'expérience et du volume d'air respiré.

plus grande si l'exhalation de l'azote ne remplaçait pas en partie, et même quelquefois en totalité, l'oxygène disparu.

Les opinions sont partagées sur le rôle de l'azote dans la respiration : selon les uns (M. Davy, le docteur Henderson), le gaz azote est absorbé dans la respiration de l'homme et des mammifères; d'après MM. Berthollet et Nysten, il y a dégagement. Enfin, M. Edwards, après un examen attentif des travaux antérieurs, a cru pouvoir admettre qu'il y a simultanément absorption et exhalation. Nous pensons que cette dernière opinion n'est nullement fondée, puisque, sur plus de deux cents expériences que nous avons faites, il y a toujours eu dégagement d'azote. Nous sommes, d'ailleurs, d'accord sur ce point avec M. Dulong.

Les expériences de Magendie sur la nutrition paraissent également favorables à l'exhalation de l'azote; on sait qu'il résulte de ces expériences que la vie des animaux ne peut être long-temps soutenue par une nourriture formée de sucre, de gomme, d'huile et d'eau distillée. Les animaux soumis à ce régime meurent au bout de peu de temps; leurs urines, d'après M. Chevreul, ne renferment que peu d'acide urique; leur bile est fortement chargée de picromel, principe dans lequel M. Thénard n'a pas trouvé d'azote.

669. Il est bien remarquable que les élémens de l'air atmosphérique, au milieu de tant de causes d'altération, conservent toujours le même rapport. La combustion du bois, l'oxidation des métaux, tendent à diminuer l'oxygène; la respiration fait disparaître une certaine quantité de ce gaz et augmente la quantité d'azote. Il faut donc que la nitri-

fication dans laquelle l'azote est absorbé, que les travaux des mines et d'autres sources naturelles d'acide carbonique balancent les premières causes.

J'ai fait, en 1822 et en 1826, l'analyse de l'air, et j'ai obtenu des résultats qui ne variaient pas sensiblement.

1re expérience	100 air atmosphérique		20,99	oxyg.
			79,01	azote
2e exp.	100	*id.*	21,01	oxyg.
			78,99	azote
3e exp.	100	*id.*	21,02	oxyg.
			78,98	azote

La moyenne est la même que celle qu'avaient donnée MM. de Humboldt et Gay-Lussac en 1805; si donc l'air subit une variation dans sa composition, elle est trop faible pour être sensible dans l'espace de 21 ans.

670. Dès l'origine de la physiologie expérimentale, les médecins éclairés ont recherché la cause du phénomène extraordinaire qui se produit dans le développement de la chaleur animale : Haller, John Hunter, Bichat, Legallois, etc., ont plus ou moins contribué à éclaircir ce sujet obscur; mais on peut affirmer que la physiologie seule ne pouvait jamais donner une solution complète des causes de ce développement de chaleur : il fallait le secours des sciences physiques, enrichies des découvertes modernes, pour mesurer l'influence de la respiration. Ce secours avait manqué aux anciens physiologistes.

On peut se convaincre par la lecture des différens ouvrages de chimie et de physiologie, que c'est seulement depuis les mémorables travaux de Lavoisier sur la combustion, que l'on a entrevu le rôle que joue la respiration dans le développement de la chaleur animale.

Parmi les savans qui ont traité ce sujet sous son véritable point de vue, on doit citer particulièrement Lavoisier, Laplace et Crawford.

Les physiologistes qui se sont le plus occupés de la chaleur animale, sont Bichat, Legallois, MM. Tillaye, Brodié, Chossat, Delarive, etc. Mais, comme on le voit aisément par la lecture des différens ouvrages écrits sur cette matière, les physiologistes, même les plus habiles, n'ont jamais traité la question directement. Le refroidissement des animaux placés dans diverses circonstances était bien propre à donner des notions utiles sur la chaleur animale, mais il ne pouvait jamais conduire à la solution complète de la question : le travail important était de faire la comparaison de la chaleur dégagée dans la combustion avec celle qui se produit dans la respiration.

Sans la connaissance complète de ces deux élémens, il serait impossible d'établir aucun système sur les causes de la chaleur animale. Les deux premières déterminations qui doivent conduire à la solution de la question, sont donc : 1° la chaleur dégagée dans la formation de l'acide carbonique; 2° la chaleur émise par un animal pendant le temps qu'il forme la même quantité d'acide carbonique.

671. Occupons-nous d'abord de la première question. Le calorimètre dont nous avons fait choix est d'une espèce particulière. Il consiste en une caisse carrée, en cuivre rouge très-mince; la caisse, le couvercle et les quatre agitateurs pèsent ensemble 4432^{g},5. Les agitateurs sont des lames étroites de cuivre recourbées, qui sont plongées dans l'eau et servent à établir l'uniformité dans la température de la masse liquide; elles sont attachées à de petites ba-

guettes en bois, afin qu'elles ne reçoivent pas de chaleur de la main qui les tient et les agite.

Le serpentin est formé par une boîte ronde et un serpentin proprement dit. Cette boîte est destinée à renfermer le creuset de platine dans lequel on a mis une quantité de carbone pur bien connue. Elle est placée au milieu d'un serpentin, avec lequel elle est en communication par deux tuyaux. L'oxygène ou l'air arrive parfaitement séché par son passage sur du chlorure de calcium. Cet oxygène, ou cet air, brûle le carbone et dépose sa chaleur en traversant le serpentin, qui présente une longueur de plus de douze pieds, et dont le diamètre est de deux à trois lignes. On connaît la température du gaz à son entrée et à sa sortie, par deux thermomètres très sensibles. Le poids du serpentin est 1620^{g},5. La quantité totale d'eau augmentée du poids de la caisse, du serpentin, etc., est de 37454^{g},6, ou environ 62 livres.

La durée moyenne des expériences était de quinze à vingt minutes; l'accroissement de la température était de 2° centrigrades environ; les thermomètres étaient assez sensibles pour qu'on pût apprécier des cinquantièmes de degré, et, comme il y en avait trois dans le calorimètre, il en résulte qu'on connaissait la température avec une assez grande exactitude. La charbon placé dans la boîte était enflammé par un moyen particulier.

Le comte de Rumford, par un artifice ingénieux, s'est mis à l'abri du refroidissement du calorimètre; il commençait par en refroidir l'eau, et il arrêtait l'expérience lorsque la température était, par l'effet qu'il voulait mesurer, autant élevée au-dessus de la température du milieu, qu'elle était d'abord au-dessous. Nous avons quelquefois

eu recours à cet artifice; mais plusieurs raisons nous l'ont fait abandonner pour prendre l'eau à la température des corps environnans : seulement il faut tenir compte du refroidissement pendant l'expérience. On peut admettre la loi de Newton sur la proportionnalité du refroidissement à l'excès de température dans un aussi petit intervalle : car les expériences de Dalton, Laroche, Dulong et Petit, qui démontrent l'inexactitude de cette loi dans des cas extrêmes, font en même temps voir qu'elle ne s'écarte pas sensiblement de la vérité quand la température du corps chaud n'est que de 20 à 30 degrés au-dessus de celle du milieu environnant (*Journ. de l'École polytechnique*, XI) : or, ici l'excès de la température du calorimètre sur la température de l'air, n'est pas supérieur à 3 degrés. On est donc tout-à-fait fondé à se servir de la loi de Newton pour établir la correction de la perte de chaleur éprouvée par le calorimètre pendant l'expérience.

672. Nous avons dû d'abord diriger notre attention sur la préparation du carbone pur; car la présence de l'hydrogène et de quelques bases dans le charbon ordinaire, aurait pu altérer les résultats des expériences. Nous nous sommes procuré du carbone pur par la décomposition du sucre blanc de première qualité; ce sucre était d'une blancheur parfaite et d'une très-belle cristallisation; chauffé avec le contact de l'air, il ne laissait pas le moindre résidu. Il a été premièrement décomposé dans un fourneau ordinaire de laboratoire, à une température rouge; il a été ensuite chauffé dans un fourneau de fondeur, alimenté par un fort soufflet. La calcination, dans ce dernier fourneau, a duré une heure. Le fourneau donnait une chaleur considérable, puisque le cuivre, l'acier, y fondaient avec

une grande facilité. Le charbon obtenu de cette manière était brillant, dur, d'une combustion très-difficile; car, placé au milieu des charbons ardens, il rougissait sans produire la plus légère flamme, et à peine était-il retiré du fourneau qu'il s'éteignait complétement; un courant d'air l'éteignait également; sa combustion ne pouvait être entretenue que par l'oxygène pur; et si le contact de ce dernier, à l'état d'une grande pureté, était suspendu un quart de minute, il devenait noir aussitôt. Ce dernier caractère, joint à la propriété de ne pas donner de flamme, distingue assez le carbone pur. Comme le diamant, il perdait son éclat, et devenait terne par un commencement de combustion. Nous nous sommes assurés que dix grammes de ce charbon ne donnaient pas d'hydrogène appréciable, même après sa transformation en eau par dix fois son poids d'oxigène. Les expériences de sir H. Davy prouvent d'ailleurs que le charbon fortement calciné ne contient pas $\frac{1}{50000}$ d'hydrogène. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. II.)

La moyenne de quatre expériences a donné 7914°,7 pour la quantité de chaleur dégagée dans la transformation d'une partie de carbone en acide carbonique, ou, en d'autres termes, la combustion d'une partie de carbone dégage une quantité de chaleur capable de fondre 104^{kr},2 de glace.

La combustion du gaz hydrogène a donné une quantité de chaleur capable de fondre 315,2 parties de glace.

Passons à la comparaison de la chaleur animale avec la chaleur dégagée dans la respiration.

On ne trouve pas dans cette recherche la même uniformité, la même constance que dans les recherches sur la matière inorganique. Ici, l'affinité des élémens est sous

l'influence de la puissance vitale, que l'âge, la température, l'état de santé, la nature des alimens et diverses autres circonstances peuvent modifier.

L'animal est placé dans une boîte en cuivre, assez grande pour qu'il n'y soit pas gêné; cette boîte a un rebord dans lequel plonge le couvercle; l'intervalle entre la boîte et le couvercle est rempli de mercure; la petite boîte renfermant l'animal est fixée dans une caisse en cuivre; on connaît exactement le poids de tout le cuivre employé et de l'eau pure qui enveloppe la boîte dans laquelle est l'animal. Tout cet appareil est placé sur des supports en bois très-sec; l'animal est, d'ailleurs, séparé du cuivre par des baguettes d'osier, afin qu'il ne lui cède pas de sa chaleur propre. L'air est fourni par un gazomètre exactement gradué; cet air passe d'abord dans la boîte pendant assez de temps pour qu'il s'y trouve, au moment où l'on prend la température de l'eau, dans le même état qu'à la fin de l'expérience : la température de l'eau est connue avec une grande précision. Pendant toute la durée de l'expérience, qui est ordinairement de deux heures, l'air arrive sur l'animal avec une vitesse constante. Le gaz qui a été respiré contient ordinairement six pour cent d'acide carbonique; on en détermine la quantité en traitant l'air par la potasse : ce fluide, dépouillé de son acide carbonique, est ensuite analysé par le gaz hydrogène. Afin de connaître avec précision les altérations de l'air dans la respiration des animaux, nous avons analysé souvent l'air atmosphérique qui devait leur être fourni, et le résultat a toujours été de 21 oxygène et de 79 azote.

673. L'appareil est tellement combiné, que le gaz respiré est reçu immédiatement sur le mercure. On n'a pas

à craindre par ce moyen la dissolution de l'acide carbonique par l'eau. La description suivante en donnera une idée (*fig.* 406).

Tout appareil propre à la mesure de la chaleur animale doit être composé de trois parties principales : d'un gazomètre fournissant l'air à l'animal, d'une boîte renfermant l'animal; enfin, d'un second gazomètre qui reçoit le gaz respiré. Les trois parties sont indiquées dans la figure par les lettres *A*, *B* et *C*.

A est le réservoir d'air : c'est un gazomètre gradué avec soin; par les tubes latéraux *H* et *F*, on connaît le niveau de l'eau dans l'intérieur, et conséquemment le volume du gaz. Un thermomètre *z* en donne la température; le manomètre *I* en fait connaître l'élasticité; un entonnoir *k* est placé au-dessus du gazomètre et entretenu constamment plein d'eau par sa communication avec un cuvier *L*, qui lui-même reçoit son eau d'un grand cylindre *p*. Au moment où l'on veut faire sortir le gaz, on ouvre le robinet de *k*; l'eau tombe et chasse le gaz par le tube *R*; la vitesse du gaz est constante pendant tout l'écoulement; on peut la reproduire la même dans toutes les expériences, par le moyen d'un arc de cercle divisé, qui permet d'ouvrir toujours le robinet de la même quantité. (*Voyez* le n° 225.)

Le thermomètre *q* donne la température de l'air à son entrée dans la boîte; le thermomètre *t* la donne à sa sortie; l'air, après la respiration, est reçu dans le gazomètre *C*, qui consiste en un grand cylindre en fonte, d'un pied environ de diamètre, dans l'intérieur duquel est fixé un cylindre en bois de 8 pouces; l'intervalle compris entre le bois et la fonte est rempli de mercure; le cylindre est recouvert du même métal. Le cylindre en bois est envelop-

pé par un cylindre creux en cuivre mobile (couvert de peinture), qui plonge d'abord dans le mercure; mais, à mesure que le gaz respiré arrive dans son intérieur, il est soulevé par un contre-poids *w*; ce contre-poids est un seau vide qui se remplit peu à peu par le moyen d'un second seau *u* plein d'eau, avec lequel il communique par un syphon étroit.

Par les règles *F* et *D*, divisées en parties égales, on connaît exactement le volume du gaz. A cause de la flexibilité du tuyau en plomb *t o*, le cylindre en cuivre peut monter sans qu'aucune partie de l'appareil souffre. Par le manomètre *J*, on juge si la pression intérieure est la même que la pression extérieure. Quand tout le gaz du réservoir *A* est chassé, on mesure exactement le volume du gaz respiré, dont on connaît la température par un thermomètre *x*. On ferme tous les robinets, et, par une pression plus ou moins forte, exercée sur le cylindre en cuivre, on fait sortir le gaz par le tube *l*; on le reçoit sur le mercure dans une capsule de porcelaine.

α, β et γ représentent les supports en bois destinés à soutenir le tuyau en plomb, à mesure que le cylindre en cuivre sort du réservoir.

Le volume d'air fourni à l'animal pendant chaque expérience est de 45 à 50 litres.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES.

1re *Expérience.*

Lapine âgée de plusieurs années.

Durée de l'expérience, 1 heure 36 minutes.

Volume d'air fourni à 8°,37 = 47l.,993 { 10l.,079 oxyg. / 37 ,914 azot.

Après la respiration,

47,842. . . . { 3,076 acide carbonique. / 6,023 oxygène. / 38,743 azote.

Acide formé. . . . . .3lit. ,076,

Azote dégagé. . . . .0 ,829,

Oxygène disparu. . . .0 ,980,

Oxygène disparu = $\frac{1}{3}$ de l'acide formé,

= $\frac{1}{4}$ de l'oxygène total consommé,

Azote dégagé = $\frac{4}{5}$ de l'oxygène disparu,

= $\frac{8}{31}$ de l'acide formé.

Calcul de cette expérience.

L'élévation de la température de 25387g,5 d'eau est de 0°,703, 25387g5 × 0°,703 est donc la quantité totale de chaleur émise par l'animal pendant l'expérience. On la représente par 100°. L'acide carbonique, formé pendant le même temps, a dégagé une certaine quantité de chaleur qu'on peut trouver, puisqu'un gramme de carbone, en se transformant en acide carbonique, dégage une quantité de chaleur capable d'élever 7914g,2 d'eau d'un degré. La composition de l'acide carbonique étant connue, on a le carbone qui y entre, et conséquemment la chaleur dégagée par la combustion de ce carbone

au sein des poumons. En faisant tous les calculs, qui sont très-faciles, on trouverait que cette quantité de chaleur est les $\frac{68,5}{100}$ de la chaleur totale, émise par l'animal, il a disparu $0^{lit.},980$ d'oxygène. Cet oxygène a formé de l'eau. La composition de ce liquide étant connue, on a l'hydrogène brûlé par l'oxygène, et d'après le n° 670, la chaleur dégagée. Cette chaleur fait les $\frac{21,9}{100}$ de la chaleur totale. On a donc :

Chaleur animale.	100	
Chaleur due à la formation de l'acide carbonique.	68,5	90,4.
Chaleur due à la formation de l'eau. . .	21,9	

On calcule de la même manière les expériences rapportées ci-après.

2e *Expérience.*

Même lapine,

Chaleur animale.	100	
Chaleur due à la formation de l'acide carbonique.	64,9	85,8.
Chaleur due à la formation de l'eau. . .	20,9	

3e *Expérience.*

Six petits lapins de 15 jours.

Durée de l'expérience, 2 heures 5 minutes.

Volume d'air fourni à $9^{\circ},25 = 49^{l.},475$ { 10,389 oxyg. / 39,086 azote.

A la fin, $48^{lit.},689 =$ { 2,955 acide carbonique. / 6,216 oxygène. / 39,517 azote.

Acide formé. . . . . $2^{lit.},955$.

Oxygène disparu. . . . .1 ,218.
Azote dégagé. . . . . .0 ,431.
Oxygène disparu $= \frac{12}{50}$ de l'acide formé,
$= \frac{12}{41}$ de l'oxygène total consommé.
Azote dégagé $= \frac{1}{3}$ de l'oxygène disparu,
$= \frac{2}{15}$ de l'acide formé.

Élévation de la température de la masse d'eau 20822 grammes, 0°,998, d'où

Chaleur animale. 100
Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .58,5 } 82,1.
Chaleur due à la formation de l'eau. . .23,6 }

4e Expérience.

Lapin mâle.
Chaleur animale. 100
Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .68,3 } 86,7.
Chaleur due à la formation de l'eau. . .18,4 }

5e Expérience.

Trois cochons d'Inde mâles adultes.
Durée de l'expérience, 1 heure 54 minutes.

Volume d'air fourni à 9°,47 = 48l.,046 { 10,089 oxy
37,957 azot

Après la respiration, 48l.,371 = { 2,588 acide carbo
6,760 oxygène.
39,023 azote.

Acide formé. . . . . .2lit. ,587,
Oxygène disparu. . . .0 ,707,
Azote dégagé. . . . . .1 ,066.

Oxygène disparu $= \frac{7}{26}$ de l'acide formé,
$= \frac{7}{33}$ de l'oxygène total consommé;
Azote dégagé $= \frac{11}{26}$ de l'oxygène disparu,
$= \frac{11}{26}$ de l'acide formé.

Elévation de la température de 23310,5 grammes d'eau, 0°,64, d'où

Chaleur animale.	100	
Chaleur due à la formation de l'acide carbonique.	69,4	88,8.
Chaleur due à la formation de l'eau. . .	19,4	

6° *Expérience.*

Trois cochons d'Inde femelles adultes.

Chaleur animale.	100	
Chaleur due à la formation de l'acide carbonique.	69,6	88,9.
Chaleur due à la formation de l'eau. . .	19,3	

7° *Expérience.*

Chienne de 5 ans environ.

Durée de l'expérience, 1 heure 31 minutes.

Volume d'air fourni à 8°,60 = 47$^{lit.}$,657	10,008	oxyg.
	37,649	azote.
Volume d'air après l'expérience, ramené à la même température. . . . . 47^{l},214	3,768	acide
	4,424	oxyg.
	39,022	azote.

Acide formé. . . . . 3$^{lit.}$,768,
Oxygène disparu. . . . 1 ,806,
Azote dégagé. . . . . 1 ,374.
Oxygène disparu $= \frac{9}{19}$ de l'acide formé.

Chienne de 7 à 8 mois.

Durée de l'expérience, 1 heure 42 minu

Volume d'air à 12°,5 = 47lit. ,891 { 10 ,
37 ,

Après la respiration, 47lit. ,265 { 2,777
5,889 o
38,599 a

Acide formé. . . . . .2lit. ,777,

Oxygène disparu. . . .1, ,391,

Azote dégagé. . . . .0 ,761.

Oxygène disparu = $\frac{1}{2}$ de l'acide for
= $\frac{14}{41}$ de l'oxygène total consommé,

Azote dégagé = $\frac{1}{2}$ de l'oxygène disp
= $\frac{1}{4}$ de l'acide formé.

Elévation de température de la masse
grammes, 1°,088, d'où

Chaleur émise par l'animal. . . . . .1(

Chaleur due à la formation de l'acide
carbonique. . . . . .4(

Chaleur due à la formation de l'eau. .2,

Durée de l'expérience, 1 heure 42 minutes.

Volume d'air fourni à 7°,37 = 47lit. ,058 { 9,882 oxyg. / 37,176 azote.

Après la respiration, 45lit. ,940 { 4lit. ,018 acide. / 3 ,649 oxygène. / 38 ,273 azote.

Acide formé. 4,018,

Oxygène disparu. 2,215,

Azote dégagé. . . . . .1,097.

Oxygène disparu = $\frac{11}{20}$ de l'acide formé

= $\frac{11}{31}$ de l'oxygène total consommé;

Azote dégagé = $\frac{11}{40}$ de l'acide formé

= $\frac{1}{2}$ de l'oxygène disparu.

Elévation de la température de la masse d'eau 25387,5 grammes, 1°,35, d'où

Chaleur animale. 100

Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .48,5 } 74,5.

Chaleur due à la formation de l'eau. . .26,0 }

10e *Expérience.*

Chat mâle, âgé de plus de 2 ans.

Durée de l'expérience, 1 heure 35 minutes.

Volume d'air fourni à 9°,47, = 47lit. ,887 { 10,055 oxyg. / 37,830 azote.

Après la respiration, 47lit. ,535 { 2,060 acide. / 7,125 oxygène. / 38,354 azote.

Acide formé. . . . . .2lit. ,060,

Oxygène disparu. . . .0 ,870,

Azote dégagé. . . . .0 ,524.

Oxygène disparu $= \frac{9}{57}$ de l'acide formé $= \frac{3}{19}$ de l'oxygène total consommé.

Azote dégagé $= \frac{5}{9}$ de l'oxygène disparu, $= \frac{5}{57}$ de l'acide formé.

Elévation de la température de 25387,5 grammes d'eau, 0°,58, d'où

Chaleur animale. 100

Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .57,7 } 80,6.
Chaleur due à la formation de l'eau. . .22,9 }

11e *Expérience.*

Trois pigeons mâles adultes.

Durée de l'expérience, 1 heure 32 minutes.

Volume d'air fourni à 9c,75 = 47lit. ,674 { 10,012 oxyg. / 37,662 azote.

Après la respiration, 47lit. ,650 = { 2,451 acide. / 6,826 oxygène. / 38,373 azote.

Acide carbonique formé. 2lit. 451

Oxygène disparu. . . .0 ,735,

Azote dégagé. . . . .0 ,710.

Oxygène disparu $= \frac{7}{25}$ de l'acide formé,

Azote dégagé $= \frac{71}{74}$ de l'oxygène disparu $= \frac{7}{25}$ de l'acide formé.

Elévation de la température d'une masse d'eau de 25387,5 grammes 0°,644, d'où

Chaleur animale. 100

Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .60,5 } 78,8.
Chaleur due à la formation de l'eau. . .18,3 }

12e *Expérience.*

Cane adulte.

Chaleur animale. 100

Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .58,3 } 79,2.

Chaleur due à la formation de l'eau. .20,9 }

13e *Expérience.*

Coq adulte.

Chaleur animale. 100

Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .60,5 } 79,7

Chaleur due à la formation de l'eau. .19,2 }

14e *Expérience.*

Grand-duc de Virginie adulte.

Durée de l'expérience, 1 heure 25 minutes.

Volume d'air fourni à 7° = 48lit. ,136 . . { 10,109 oxyg. / 38,027 azote.

Volume après la respiration, ramené à la température de 7°,00 = 47lit. ,838 { 1,601 acide. / 7,483 oxygène. / 38,754 azote.

Acide formé. . . . . .1lit. ,601

Oxygène disparu. . . .1 ,025

Azote dégagé. . . . . .0 ,727

Oxygène disparu = $\frac{10}{16}$ de l'acide formé,

Azote dégagé = $\frac{7}{16}$ de l'oxygène disparu = $\frac{7}{16}$ de l'acide formé.

Elévation de la température de la masse d'eau 25187 grammes, 0°,55, d'où

Chaleur animale. 100

Quatre chouettes.

Chaleur animale. 1

Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .

Chaleur due à la formation de l'eau. . . 1

16e *Expérience.*

Quatre pies, nourries avec de la viande.

Chaleur animale. 1

Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . .

Chaleur due à la formation de l'eau. . . 1

La masse d'eau n'est pas égale dans t riences : cela tient à ce qu'on n'a pas touj même calorimètre.

Le volume d'air, après l'expérience, est température un peu plus élevée que celle ment; on a ramené le volume par le calcul ture initiale.

loppement de la chaleur animale; que l'assimilation, le mouvement du sang, le frottement des différentes parties, le système nerveux peut-être, peuvent produire la petite portion que la respiration ne représente pas.

2°. Qu'outre l'oxygène employé à la formation de l'acide carbonique, une autre portion de ce gaz, quelquefois très-considérable relativement à la première, disparaît aussi (on pense qu'elle est employée à la combustion de l'hydrogène du sang); qu'il disparaît en général plus d'oxygène dans la respiration des jeunes animaux que dans la respiration des animaux adultes. (*Voyez* le second extrait de mes recherches sur les causes de la chaleur animale.)

3°. Qu'il y a exhalation d'azote dans la respiration des mammifères carnivores ou frugivores, et dans la respiration des oiseaux; que la quantité d'azote exhalé est plus grande chez les frugivores que chez les carnivores.

4°. Que, dans le développement de la chaleur animale, la respiration produit chez les carnivores une portion moins considérable de la chaleur animale totale que chez les frugivores, et qu'il en est de même des oiseaux, comparés aux mammifères.

Plus de deux cents expériences analogues ont été faites à des époques différentes (août et septembre 1822; septembre et octobre 1823; janvier, février et mars 1824) sur des canards adultes, des canards jeunes; sur des poules, des coqs, des poulets, des pigeons adultes, sur des pigeons jeunes, des goelands, des buses, des ducs (1),

(1) M. Fréd. Cuvier, qui saisit toutes les occasions de seconder les per-

très-jeunes animaux qui perdent quelqu
de leur chaleur propre.

(D'après des expériences inédites de
lesquelles l'air respiré était reçu dans un
était séparé de l'eau par un flotteur, et p
quelles ce savant s'est servi des données
et de Laplace sur la combustion, la respi
une moindre quantité de la chaleur total

Le travail dont je donne ici l'extrait,
question qui avait été proposée par l'Aca
ces. Depuis l'époque où cette illustre so
mon travail, je me suis occupé d'autr
logues, telles que celles de l'influence
d'oxygène de l'air; de la comparaison d
male totale à la chaleur de la respiratio
carbone et l'hydrogène liquides; de la re
tiles, etc. Je réunirai tous ces résultats d
ticulier. Il suffit à notre objet d'avoir i
tats principaux fournis par les animaux à
cés dans les circonstances ordinaires.

NOTES.

Longueur du pendule à secondes. — Page 31.

La longueur du pendule à secondes croît porportionnellement au carré du sinus de la latitude. En sorte que si l'on désigne par 1 la longueur du pendule à l'équateur, et par y l'accroissement total au pôle, on aura généralement, pendule $= 1 + y \sin^2 L$.

L'aplatissement est, d'après la théorie, égale à $\frac{1}{2}$ du rapport de la force centrifuge à la pesanteur, moins l'excès de la longueur du pendule au pôle, sur sa longueur à l'équateur divisé par cette dernière longueur. De plus, le premier rapport est $\frac{1}{289}$, donc

$$\text{aplatissement} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{289} - \frac{y}{1} = 0{,}00865 - y.$$

Pour déterminer le coefficient y, supposons qu'on adopte l'aplatissement moyen $\frac{1}{193}$ qui est donné par les nombreuses expériences de MM. Frécynet, Sabine et Duperrey, on aura

$$\text{aplatissement } \frac{1}{193} = 0{,}00865 - y,$$

d'où l'on tire $y = 0{,}0052022$.

La formule précédente du pendule devient alors $1 + 0{,}0052022 \sin^2 L$. Cette formule donne 1,00294846 pour la latitude 48°. 50′. 14″ de l'Observatoire de Paris. Voyons par quel facteur il faut multiplier ce résultat pour obtenir la longueur du pendule mesuré par Borda. Borda a trouvé à Paris la longueur du pendule à secondes dans le vide de 440^{lig}, 5593 = 0^{m},9938266. Si l'on y ajoute 0^{m},0000197 pour la réduction au niveau de la mer, on aura 0^{m},9938463 pour la longueur du pendule à secondes sexagésimales dans le vide, au niveau de la mer et à 48° 50′ 14″ de latitude. On trouvera aisément que 1, 00294846 × 0^{m},9909246 = 0^{m},9934633; le facteur 0^{m},9909246 est précisément celui par lequel il faut multiplier la formule générale $1 + 0.0052022 \sin^2 L$, pour la réduire en parties du mètre. En effectuant cette opération, on aura enfin :

Longueur du pendule sexagésimal $= 0^m.9909246 + 0^m.005155$ sin L, d'après Borda, et en adoptant l'aplatissement $\frac{1}{[illegible]}$.

Tubes capillaires. — Page 52.

La théorie des phénomènes capillaires ne peut être exposée d'une manière complète que par le secours de l'analyse la plus élevée.

Nous nous bornerons [illegible] ître d'abord le phénomène expérimental et les principale[illegible] nces qui y ont rapport. Ensuite nous chercherons à [illegible] des causes des phénomènes de ce genre.

C'est un fait depuis [illegible] nstaté, que lorsque l'on plonge un tube d'un diamètre [illegible] un liquide, le niveau dans l'intérieur est différent du nive[illegible] ur, et quand le tube est susceptible d'être mouillé par le liquide, [illegible] niveau dans l'intérieur du tube est plus élevé : par exemple, c'est ce qui est constamment offert par l'immersion d'un tube de verre propre dans l'eau, l'alcool, etc. Si le tube n'est pas mouillé par le liquide dans lequel on le plonge, le niveau de l'intérieur est moindre que le niveau extérieur : c'est ce qui arrive quand on plonge un tube mouillé dans le mercure, ou un *tube* graissé dans l'eau.

Les phénomènes capillaires sont tout-à-fait indépendans de la pression atmosphérique puisqu'ils sont les mêmes dans le vide que dans l'air.

On comprend sous le nom de phénomènes capillaires, non-seulement les phénomènes présentés par les tubes étroits, mais encore beaucoup d'autres dont la cause est l'attraction exercée à de très-petites distances.

Les actions qui sont la cause des phénomènes capillaires ne s'exercent qu'à des distances fort petites. Pour le démontrer d'une manière expérimentale, plongez dans l'alcool ou dans l'eau plusieurs tubes de verre égaux dans leur diamètre intérieur, mais différens par l'épaisseur de leurs parois, vous verrez que l'ascension a lieu à la même hauteur dans tous. Soufflez à une lampe d'émailleur, une boule de verre très-mince, plongez-la dans un liquide, plongez-y aussi une boule d'un même diamètre, mais entièrement massive, vous enleverez absolument

la même quantité de liquide. On peut encore ajouter à ces expériences, les résultats fournis par les disques; on sait qu'un disque de verre, de métal, etc., placé à la surface d'un liquide, exige pour être soulevé une force supérieure à celle qui représente le poids de ce disque : cet excès de poids, dû à l'attraction exercée par la matière du disque sur le liquide, est le même, quelle que soit l'épaisseur du disque : de même lorsque des tubes d'un égal diamètre sont mouillés complétement par un liquide dans toute leur étendue, son élévation est la même dans tous, quelle que soit la nature de leur substance.

Clairaut avait donné une théorie mathématique des phénomènes capillaires, mais cette théorie était incomplète. M. de Laplace a repris ce sujet, et l'a traité dans toute son étendue. Nous indiquerons les principaux résultats auxquels l'analyse a conduit ce célèbre géomètre.

Il faut d'abord concevoir qu'un liquide en repos exerce sur lui-même une action indépendante de la pesanteur terrestre, action qui tend à faire rentrer les molécules situées à la surface dans l'intérieur du liquide, et qui produirait réellement cet effet sans la résistance apportée par l'impénétrabilité. Maintenant les calculs de M. de Laplace montrent que si par une circonstance quelconque la surface devient concave ou convexe, comme cela arrive dans les tubes capillaires, l'action du liquide sur lui-même est différente de ce qu'elle était dans le cas d'une surface plane.

Si l'on représente par F, l'action d'une surface plane, celle d'une surface convexe sphérique est plus grande, et si l'on représente son rayon par R, elle sera $F + \frac{C}{R}$, l'action d'une surface sphérique concave du même rayon sera $F - \frac{C}{R}$, C étant une quantité constante : de sorte que la différence entre l'action d'une surface plane et celle d'une surface sphérique est en raison inverse du rayon de la sphère. Le premier cas est celui de l'eau ; de l'alcool et des autres liquides semblables qui mouillent parfaitement le verre ; le second est celui du mercure.

En partant de ces données mathématiques, il est facile de trouver la raison physique qui détermine l'ascension ou l'abaissement des liquides.

dans les tubes capillaires. En effet, supposons un ménisque concave (*fig.* 407).

Imaginons un second tube dont les parois infiniment minces soient le prolongement de la surface intérieure du premier tube ; supposons de plus que le tube se replie par dessous de manière à venir se terminer en *B* à la surface libre du liquide. Le tube *A C D B* est pressé à ses deux orifices *A* et *B* par deux forces inégales ; l'une en *B* est l'action d'un corps terminé par une surface plane, l'autre en *A* est celle du même corps terminé par une surface concave ; or, cette dernière est plus faible, il faut donc pour l'équilibre que le liquide soit plus élevé dans le tube capillaire *A C* ; et comme dans les tubes capillaires, le rayon du ménisque est celui du tube même, il en résulte que la hauteur de la petite colonne sera en raison inverse du diamètre du tube, c'est en effet ce qui est conforme aux expériences de plusieurs physiciens et en particulier à celles de M. Gay-Lussac, qui ont été faites avec un soin extrême.

Exemples :	Élévation en millimètres.	
Diamètre des tubes en millimètres.	Eau.	Alcool.
1,294	23,163	9,182
1,904	16,586	6,084

La densité de l'alcool était de 0,820, la température des expériences était de 8° 5 lignes.

Si la surface du liquide dans le tube était convexe, les résultats seraient contraires ; l'action exercée par la surface convexe étant supérieure à celle qu'exerce le plan, le liquide devrait s'abaisser au-dessous du niveau (*fig.* 408), et la hauteur de la colonne serait en raison inverse du diamètre du tube ; l'expérience est encore ici tout-à-fait d'accord avec la théorie.

La même théorie explique l'ascension de l'eau dans l'intervalle de deux cylindres concentriques entre des plans et dans des tubes coniques, la forme sphérique que prennent les gouttes de liquide, la courbe d'un liquide entre deux lames de verre peu inclinées, etc.

Par exemple, introduit-on dans un tube conique de verre, une goutte d'eau ou d'alcool ; cette goutte prendra une forme concave

aux deux extrémités, et comme l'action d'une surface est en raison inverse de son rayon, il est visible que le liquide marchera vers le sommet (*fig.* 409).

Il y a une infinité de faits dont la cause est la même que celle qui produit les phénomènes capillaires ; par exemple, la rapide ascension de l'eau dans un corps poreux (sucre blanc, brique) qu'on y plonge ; c'est en vertu de la même action que l'eau s'élève dans les murs, dans le sable, etc.

Voyez la Théorie complète dans les Mémoires de M. de Laplace, supplémens à la mécanique céleste ; *Voyez* aussi une note de M. Lehot et plusieurs Mémoires de M. Girard. Un Mémoire de M. Navier ; des Observations de M. Petit, etc. (*Ann. ch. et phys.*, t. 4, 5, 6.)

Page 94.

Soient K et K' les dilatations apparentes d'une même substance, renfermée dans une même enveloppe, aux températures t et t' ;

D et D' les dilatations absolues de la même substance ;

d et d' les dilatations absolues de la matière de l'enveloppe.

on aura $K = D - d$; $K' = D' - d'$.

Si le rapport entre les dilatations absolues de la substance et de l'enveloppe était le même à toutes les températures, on aurait :

$D : D' :: d : d' ::$ d'où $D - d : D' - d' :: D : D'$.

Dans ce cas, les dilatations absolues étant proportionnelles aux dilatations apparentes, les températures indiquées par un thermomètre à enveloppe, seraient les mêmes que celles de la substance ; ce qui est loin d'avoir lieu comme le montre le tableau suivant tiré du Mémoire de MM. Dulong et Petit, cité plus haut.

Thermomètre à air.	300°
Thermomètre à mercure.	307,64
Mercure.	314,15.

Page 95.

Afin d'éviter la correction pour la partie de la tige du thermomètre qui n'est pas en contact avec le corps, dont on prend la température, on détermine cette température d'une autre manière. Au lieu de mesurer immédiatement l'augmentation de volume d'une masse constante de matière, comme on le fait dans les thermomètres

ordinaires, on détermine la perte de poids qu'éprouve une masse de mercure capable de remplir un vase de verre à zéro, lorsque le vase est plongé dans le liquide dont on veut connaître la température : on prend à cet effet un tube de quelques décimètres de longueur, terminé par un tube capillaire dont le diamètre est infiniment petit, de sorte que la quantité de mercure que ce dernier renferme, peut être négligée sans erreur sensible.

Soit P le poids total du mercure contenu dans le vase à 0; p le poids de la portion de ce liquide qui sort du tube, quand on le porte de 0 à t, $\frac{p}{P-p}$ sera la dilatation apparente que nous avons trouvée égale à $\frac{1}{6480}$, nous aurons donc, $\frac{p}{(P-p)} = \frac{t}{6480}$ ou $t = \frac{6480\,p}{P-p}$.

Par exemple, un tube renferme 610g,225 de mercure à zéro; plongé dans un bain d'huile, il perd de son poids 248,863 : on demande la température qu'indiquerait le thermomètre à mercure, s'il avait été plongé dans le même bain ; on trouve, en faisant le calcul, 275°,23.

Sur la détermination des hautes températures par le thermomètre à air. — Page 95.

On emploie à cet effet un tube du diamètre des tubes de baromètre, terminé par un tube court et d'un diamètre très-petit : ce dernier tube sort du bain dont on veut connaître la température ; la capacité de ce tube doit être négligeable, puisqu'elle ne participe pas à la chaleur du bain. Quand le thermomètre à air a acquis la température du bain, on ferme au chalumeau l'extrémité du tube capillaire, et l'on note la hauteur du baromètre. On enlève le tube et on le laisse refroidir dans une chambre dont la température est constante et bien connue. Quand le tube a pris la température de la chambre on plonge l'extrémité effilée dans un verre contenant du mercure bien sec, on casse l'extrémité effilée, on note la hauteur du baromètre, la hauteur de la colonne de mercure entré dans le tube, on pèse le tube avec la colonne de mercure, on le pèse plein, on note la température de la chambre, et l'on a toutes les données nécessaires pour trouver la température indiquée par la dilatation de l'air.

Soit (figure 48) $BC = h$, la hauteur du mercure dans le tube :

soit P', le poids du mercure de cette colonne, soit P, le poids du mercure qui remplit tout le tube à la température t; $P - P'$ sera le poids du mercure dont le volume égale celui de l'air froid; appelant T la température élevée comptée sur le thermomètre à mercure, H' et H, les hauteurs du baromètre au moment où l'on ferme le tube, et où l'on prend le poids du mercure élevé dans le tube, X la température du thermomètre à air, a le coefficient de la dilatation des gaz.

K' le coefficient du verre entre zéro et t;

K, le même entre zéro et la température T; ces deux températures sont comptées sur le thermomètre à mercure.

$\frac{P(1+KT)}{d(1+K't)}$ est la capacité du vase à la température T du thermomètre à mercure, $\frac{(P-P')(H-h)(1+aX)}{d(1+at)H'}$, est le volume de l'air à la température X du thermomètre à air; ce volume remplit la capacité du tube; on aura donc l'équation.

$$\frac{(P-P')(H-h)(1+aX)}{(1+at)H'} = \frac{P(1+KT)}{1+K't}. \text{ D'où l'on tire}$$

$$X = \frac{PH'(1+KT)(1+at) - (P-P')(H-h)(1+K't)}{a(P-P')(H-h)(1+K't)}.$$

Les valeurs numériques des diverses lettres qui entrent dans cette formule, sont :

$P = 550,224.$ $H = 0,757.$ $H' = 0,752.$ $T = 275^{\circ},23$

$P' = 129,254.$ $h = 0,125.$ $t = 15^{\circ},25.$ $a = 0,00375.$

$P - P' = 220,970.$ $H - h = 0,632.$ $1 + at = 1,057125.$

$K = \frac{1}{32908}$ $K' = \frac{1}{38700}$ $1 + KT = 1,00837.$

$1 + K't = 1,000394.$

$PH'(1+KT)(1+at) = 280,73619$

$(P-P')(H-h)(1+K't) = 139,70799.$

La différence de ces deux quantités $= 141,02820$

$a(P-P')(H-h')(1+K't) = 0,52390$

$X = \frac{141,02820}{0,52390}$

Ce qui apprend que le thermomètre à air ne marque que 269°.18. quand le thermomètre à mercure marque déjà 275°,23.

Si l'on fait $K = K'$, ce qui n'apporte qu'une légère erreur, et si l'on fait attention que $\frac{1 + KT}{1 + Kt}$ = sensiblement $1 + K(T - t)$, et si l'on met au lieu de a sa valeur $\frac{1}{266,7}$ on aura,

$$X = \frac{P H' (1 + K(T - t) (266,7 + t)}{(P -}$$ [illegible] $- 266,7$.

Nous indiquerons un se[illegible]édé. Le tube (*fig.* 410) plein d'air a une dispositio[illegible]lle du tube dans le procédé précédent, le tube très-étro[illegible]est soudé se recourbe à angle droit et plonge dans [illegible]eine de mercure.

Quand le tube p[illegible]is la température du bain, on porte sous l'extrémité [illegible]ube vertical une capsule pleine de mercure bien desséché. On [illegible] la hauteur du baromètre extérieur; dès que l'air de l'intérieur est complétement refroidi, on prend la hauteur du mercure dans le tube vertical, on note aussi la hauteur du baromètre. On peut donc calculer quelle aurait été la dilatation de l'air s'il avait conservé la même élasticité.

Pour faire ce calcul avec exactitude, il faut d'abord mesurer la dépression capillaire dans le tube vertical, afin de l'ajouter à la hauteur du mercure dans ce tube.

Il faut aussi déterminer d'avance le diamètre du tube vertical; car l'air de la portion de ce tube qui se remplit de mercure, et dont la température est sensiblement constante, rentre en partie dans le large tube (*fig.* 410).

Soient h la hauteur du baromètre pendant l'expérience; T la température de l'air chaud, comptée sur le thermomètre à mercure; t celle de l'air froid; h' la hauteur du mercure soulevé dans le tube; 1 le volume du tube AB; r celui du tube AC.

b la hauteur totale du tube vertical; K la dilatation du verre dans l'intervalle des températures extrêmes de l'expérience, comptées sur le thermomètre à mercure.

Soient d la densité de l'air à la température t et à la pression h; d' la densité du même fluide à la température T et à la même pression.

Le poids de l'air contenu à la température maximum T du

bain sera présenté par $(1 + K(T - t))\, d' + d\,r$. (On prend $1 + K(T - t) = \frac{1 + KT}{1 + Kt}$)

Le volume de l'air refroidi étant $\left(1 + r\frac{b - h'}{b}\right)$ à la pression $h - h'$, deviendra $\left(1 + r\frac{b - h'}{b}\right)\frac{h - h'}{h}$ à la pression h, le poids de ce volume sera $\left(1 + r\frac{b - h'}{b}\right)\frac{h - h'}{h}\, d$, le poids de l'air chaud est égal au poids de l'air refroidi, puisque c'est le même air; on a donc

$$\left(1 + r\frac{b - h'}{b}\right)\frac{h - h'}{h}\, d = (1 + K(T - t))\, d' + r\, d.$$

Ou en remplaçant $\frac{d'}{d}$ par son égal $\frac{1 + a\,t}{1 + a\,T'}$, T' étant compté sur le thermomètre à air

$$(1 + K(T - t))\left(\frac{(1 + a\,t)}{1 + a\,T'}\right) = \left(1 + r\frac{b - h'}{b}\right)\frac{h - h'}{h} - r.$$

Tout est connu dans cette équation, à l'exception de T'; on peut donc l'en déduire. MM. Dulong et Petit ont employé ce second moyen pour trouver les rapports entre les degrés du thermomètre à air et ceux du thermomètre à mercure; ils ont obtenu les mêmes résultats que par le premier procédé. (*Journal de l'École polytechnique*, t. XI, p. 200.)

On pourrait, de la même manière, déterminer les températures supérieures à celle de la fusion du verre. Il suffirait d'employer une sphère de platine $A\,B$ (*fig.* 411), à laquelle serait adapté un tube $B\,H\,K$ en platine, qui serait terminé par un tube en verre $K\,E$. On placerait la sphère dans le foyer dont on voudrait connaître la température; on porterait l'extrémité du tube E dans le mercure, et l'on connaîtrait la température par la formule précédente.

Sur la dilatation des liquides. — PAGE 83.

On a représenté la dilatation des liquides par la formule

$$D = a\,t + b\,t^2 + c\,t^3$$

On détermine les constantes a, b, c, pour trois températures différentes ; on introduit les valeurs numériques dans la formule, et les dilatations données par la formule pour les températures comprises entre celles qui ont servi à la détermination des constantes, sont assez d'accord avec l'expérience.

Sur le froid produit. — PAGE 120.

L'équation $F(x)\,d\,l = (P - F(x))\,(t - x)\,c$, établit une relation entre les différens élémens qui jouent un rôle dans cette expérience, et permet de calculer l'abaissement correspondant à une température donnée.

x est le degré de froid produit dans l'expérience, l la chaleur latente de la vapeur d'eau ; la force élastique de la vapeur est une fonction de la température ; elle est ici représentée par $F(x)$.

d la densité de la vapeur rapportée à celle de l'air ; c sa capacité ; P sa pression ; t la température de l'air.

Le premier membre est le froid produit par l'évaporation : le second représente la chaleur fournie par le contact de l'air ; ces deux quantités sont sensiblement égales, pour des faibles degrés de froid. A l'invitation de M. Gay Lussac, j'ai calculé les diverses valeurs de x, et j'ai trouvé des résultats peu éloignés des résultats de l'expérience.

On avait pris $d = \frac{10}{16}$, $l = 550$; $c = 0,2669$;

Et $F\,x = 0^m,76\,(10)^{x\,0,0154547 - x^2\,0,00006258}$.

Cette formule est d'autant plus exacte que le froid produit est plus faible. En effet, le froid calculé est à zéro de 5, 85, ce qui ne diffère de 5, 82, résultat de l'expérience, que de 0, 03 ; tandis qu'à 15° la différence est dans le même sens de 0,33, et à 25 de 1°, 05. Il en doit être ainsi puisque la quantité négligée, le rayonnement des corps environnans exerce une influence d'autant plus grande que le froid produit est plus considérable. (*An. de ch. et de ph.*, t. 21.)

Sur les forces élastiques des vapeurs. — PAGE 127.

Les forces élastiques varient d'une manière assez régulière.

Si l'on suppose d'abord nulle la variation du coefficient, et si l'on représente par A le coefficient constant par lequel il faut multiplier une force élastique pour avoir la suivante, on aura :

$f = 0,^{m}76.\ f_1 = 0,^{m}76\ A,\ f_2 = 0,^{m}76\ A_2 \ldots f_t = 0,^{m}76\ A^t.$

D'où, $\log. f_t = \log. 0,^{m}76 + t \log. A.$

L'hypothèse, faite plus haut, d'un coefficient constant n'est pas rigoureusement conforme aux expériences, de sorte qu'il faut remplacer le terme $t \log. A$, par un terme plus composé ; la substitution d'un terme de la forme $a\,t + 6\,t^2 + c\,t^3$ conduit à

$$f_t = 0^{m},76 \times 10^{a\,t + 6\,t^2 + c\,t^3}.$$

Cette formule a été proposée par M. de Laplace : f_t est la force élastique à la température t; t est positif au-dessus de 100, et négatif au-dessous ; si l'on calcule d'abord les coefficiens a, b, c, pour trois températures, par exemple, pour 25, 50 et 75 degrés, et si l'on substitue leurs valeurs numériques dans la formule, elle représentera alors assez bien toutes les forces élastiques intermédiaires. Il est clair que plus les trois températures qui servent à la détermination de a, de b, et de c, seront rapprochées, mieux la formule représentera l'expérience : en sorte qu'il est indispensable de calculer plusieurs fois les coefficiens a, b, c, dans un intervalle étendu, par exemple, dans l'intervalle de 150 degrés.

Des lois du refroidissement. — Page 184, n° 154.

Si la loi de Newton était vraie, les temps étant en progression arithmétique, les excès de température du corps sur celle du milieu, seraient en progression géométrique, c'est-à-dire, qu'on aurait la série :

Temps.	Excès.
$0'$	E
1	$E\,m$
$2'$	$E\,m^2$
$3'$	$E\,m^3$
T	$E\,m^t$ (a

On parvient, comme on va le voir à cette série, en supposant que la perte soit proportionnelle à l'excès de la température du corps sur celle de l'espace environnant. Soit T l'excès initial ; le corps perdra $\frac{T}{n}$ dans la première unité de temps, de sorte qu'au commencement de la seconde unité, elle sera $T - T\frac{1}{n}$; pendant cette seconde unité, la perte sera d'après la loi, $\frac{1}{n}T(1-\frac{1}{n})$ et conséquemment l'excès de la température au commencement de la troisième sera $T(1-\frac{1}{n})^2$; et en continuant de la même manière, on trouverait, $T(1-\frac{1}{n})^t$ au bout du temps t : ces divers excès, T ; $T(1-\frac{1}{n})$; $T(1-\frac{1}{n})^2$ .... $T(1-\frac{1}{n})^t$; forment une progression géométrique, dont la raison est $1-\frac{1}{n}$.

Mais la perte croît plus que proportionnellement à la température, ce qui a été prouvé dans le texte, de sorte que l'excès au bout du temps t, n'est pas $T = E\,m^t$, mais $T = E\,m^{a\,t + b\,t^2}$.

Formule analogue à celle qui nous a servi à interpréter les forces élastiques. Si les coefficiens m, a et b sont déterminés convenablement, cette formule pourra représenter, avec une grande exactitude, le refroidissement dans les limites où les coefficiens ont été calculés.

Cette formule permet de calculer la vitesse du refroidissement correspondante à un excès de température, ou le rapport entre la perte et le temps pendant lequel cette perte a lieu : en effet,
$\log T = \log E + (a\,t + b\,t^2)\log m$, ou en différenciant chaque membre $\frac{dT}{dt} = T \log m\,(a + 2\,b\,t)$,

$\frac{dT}{dt}$, vitesse calculée, doit toujours excéder la perte réelle, puisque T diminue pendant l'instant qu'on considère, quelque petit qu'il soit.

PAGE 287.

Nous espérions donner ici toutes les formules du mémoire de MM. Dulong et Petit, sur les lois du refroidissement. Mais le volume s'est tant augmenté par les additions que cela est devenu impossible.

Nous nous bornerons à dire que ces savans physiciens ont représenté la loi du refroidissement dans le vide par la formule

$V = m a^{\theta} (a^{t} - 1)$;

V est la vitesse ;

θ étant la température de l'enceinte ; $\theta + t$ celle du corps.

Si θ est constant, $m a^{\theta}$ le sera aussi, et la loi du refroidissement pourra s'énoncer ainsi.

Lorsqu'un corps se refroidit dans une enceinte vide et entretenue à une température constante, la vitesse du refroidissement, pour des excès de température en progression arithmétique, croît comme les termes d'une progression géométrique, diminués d'un nombre constant.

MM. Petit et Dulong ont vérifié la formule précédente sur plusieurs cas particuliers, et ils ont trouvé qu'elle est une représentation fidèle de l'expérience.

La valeur de a rapport de cette progression peut se déterminer d'après les expériences de la page 188 ; car on voit par ces expériences que l'excès t demeurant constant, et la température θ de l'enceinte variant de 20, la vitesse du refroidissement se trouve multipliée par 1,16, et comme dans ces cas deux vitesses consécutives sont :

$$V = m a^{\theta} (a^{t} - 1)$$

$$V' = m a^{\theta + 20} (a^{t} - 1 \text{ on a}$$

$$\frac{V'}{V} = a^{20} = 1{,}16 \text{ ; d'où, } a = 1{,}0077.$$

Du refroidissement dans les gaz. — Page 190, n° 156.

1°. Il résulte des expériences rapportées à la page 189 que les pertes de chaleur dues au contact d'un gaz, sont indépendantes de la nature de la surface du corps.

2°. Nous avons dit (page 190) que la vitesse de refroidissement dans un gaz reste la même, si la température et la densité de ce gaz changent de manière à lui conserver une élasticité constante. Cette proposition résulte d'expériences faites sur l'air, le gaz hydrogène; nous rapporterons quelques résultats sur l'air.

Excès de température du thermomètre sur l'air environnant.	Vitesse de refroidissement due au contact seul de l'air sous $0^m,36$, et à la temp. 20°.	Vitesse sous $0^m,36$ et à 60°.
200°	4°,01	4°,10
160°	3°,03	2°,99
120°	2°,12	2°,16

3°. Les quantités de chaleur enlevées par un gaz, sous diverses pressions, variant en progression géométrique, sont aussi en progression géométrique. Nous ne rapporterons que quelques expériences sur l'air.

Excès de température sur l'air environnant.	Vitesse de refroidissement due au contact, sous $0^m,72$.	*Idem* sous $0^m,36$.	*Idem* sous $0^m,18$.	*Idem* sous $0^m,09$.	*Idem* sous $0^m,045$
200°	5°,48	4°,01	2°,95	2°,20	1°,59
160°	4°,17	3°,03	2°,21	1°,62	1°,20
120°	2°,90	2°,12	1°,57	1°,15	0°,84
80°	1°,77	1°,29	0°,96	0°,70	0°,52

Le rapport de la progression géométrique des pressions est 2; celui de la progression des vitesses est 1,36 pour l'air; ce dernier rapport devient 1,30 pour l'hydrogène, 1,43 pour l'acide carbonique, 1,41 pour le gaz oléfiant.

On peut représenter d'une manière plus simple le résultat précédent.

Si P est le pouvoir refroidissant de l'air sous la pression p; ce pouvoir deviendra $P\,(1,366)$ sous la pression $2\,p$; $P\,(1,366)^2$ sous la pression $4\,p$; et $P\,(1,366)^n$ sous la pression $2^n p$. Si l'on fait $p\,2^n = p'$ et $P\,(1,366)^n = P'$; on aura

$$n \log 2 + \log p = \log p'$$
$$n \log (1,366) + \log P = \log P'$$

D'où $\frac{\log P' - \log P}{\log (1,566)} = n$, $\frac{\log p' - \log p}{\log 2} = n$. $\log P' - \log P =$ $(\log p' - \log p) \frac{\log 1,56}{\log 2}$ ...

On en passant aux nombres :

$$\frac{P'}{P} = \left(\frac{p'}{p}\right)^{0,45}.$$

Pour le gaz hydrogène l'exposant serait 0,38.

4°. Si l'on compare les vitesses de refroidissement dans différens gaz, on voit qu'elles conservent le même rapport. La loi de ces vitesses est donc indépendante de la nature et de la densité des gaz.

5°. Les quantités de chaleur qu'un gaz enlève à un corps croissent en progression géométrique, pour des excès de température croissant aussi en progression géométrique. Le rapport de la progression des températures étant 2, celui de la progression des pertes du corps est 2.55. D'où par des calculs semblables aux précédens, on est conduit à ce résultat plus général, savoir : que les pertes de chaleur dues au contact d'un gaz, sont proportionnelles aux excès de température des corps élevés à la puissance 1,233.

Si nous voulons obtenir l'expression générale du refroidissement occasioné par le contact seul d'un fluide, il faut nous rappeler : 1° que ce refroidissement est indépendant de l'état de la surface du corps ; 2° que la température et la densité de ce fluide ne l'affectent qu'autant qu'elles font varier la pression. En sorte que le pouvoir refroidissant d'un fluide ne dépend en définitive que de l'élasticité.

Si p désigne la pression, et t l'excès de la température du corps, et V la vitesse du refroidissement, on aura :

$$V = m\, p^c\, t^b\ ;$$

b, étant le même pour tous les gaz et pour tous les corps, et égal à 1,233 ; c, étant aussi le même pour tous les corps, mais variant d'un gaz à un autre, m variant avec la nature de chaque gaz et avec les dimensions du corps.

$c = 0,45$, pour l'air ; 0,38, pour l'hydrogène ;

$m = 0,00\,919$, dans l'air pour le thermomètre employé dans les expériences citées.

(*Voyez* pour plus de détails, le Mémoire cité, page 285.)

PAGE 214.

Nous ne donnerons pas ici toutes les formules que nous nous proposions de donner, le volume étant devenu plus fort que nous ne l'avions présumé.

Nous nous bornerons à donner la formule qui nous a servi à calculer nos expériences. Nous avons vu (page 211) que z_1 z_2 z_3 z_4 étant les excès de température [illegible] rmomètres consécutifs et équidistans. On a $q = \frac{z_1 + z_3}{z_2}$ [illegible] $\frac{z_4}{}$. Il sera donc nécessaire d'avoir 4 thermomètres con[illegible] afin de pouvoir comparer les valeurs de q qui ne doivent [illegible]

Le calcul donne la rel[illegible] $\left(\frac{\log x}{\log e}\right)^2 \ldots (a)$

Dans cette formule on a [illegible] é par h la conductibilité extérieure; par l le contour de la barre; par s l'aire d'une section de la barre; par e la base des logarithmes neperiens; par k la conductibilité intérieure, c'est cette dernière quantité qu'il s'agit de déterminer.

x dépend de la marche des thermomètres placés dans la barre. On obtient x par l'équation du second degré $q = x + \frac{1}{x}$.

Si l'on se borne à rechercher les rapports de conductibilité, on prendra des barres égales dans leurs dimensions, et couvertes d'un même vernis. h, l, s, e, restant les mêmes dans toutes les expériences, l'équation (a) pourra être réduite à $k = \frac{1}{\log x^2}$.

C'est à l'aide de cette équation que nous avons déterminé les rapports de conductibilité donnés dans le texte.

Voyez l'ouvrage de M. Fourier pour plus de développemens.

Sur la mesure des hauteurs par le baromètre. — PAGES 253-254.

$A\,H$ est la colonne atmosphérique (*fig.* 412).

$A\,B$ la surface de la terre.

La colonne atmosphérique $A\,H$ est divisée en parties égales.

$B\,D$ est le baromètre qui fait équilibre au poids d'air.

$Y.$, Y_2, Y_3, Y_4, sont les hauteurs au-dessus de la surface de la terre.

$h.$, h_2, h_3, etc., les hauteurs du mercure dans le baromètre.

$Y_2 - Y.$ est l'épaisseur d'une couche d'air assez peu étendue en hauteur pour qu'on puisse en supposer la densité constante.

$h_1 - h_2$ est l'abaissement du mercure correspondant à la différence $Y_2 - Y$. Si d est la densité de l'air comparée à celle du mercure, on aura $d = \frac{h. - h_2}{Y_2 - Y}$.

La densité d'un fluide élastique est proportionnelle à la pression qu'il supporte. Ainsi $d = \frac{h. - h_2}{Y_2 - Y} = C h.$ C est une constante dont on déterminera la valeur.

On tire de cette équation $h_2 = h.\ (1 - C\ (Y_2 - Y.)$, par suite $h_3 = h_2\ (1 - C\ (Y_3 - Y_2)$ $h_4 = h_3\ (1 - C\ (Y_4 - Y_3)$.

Comme on peut prendre l'épaisseur de chaque couche égale à D, ces équations donneront $h_2 = h.\ (1 - C\ D)$. $h_3 = h.\ (1 - C\ D)^2$ $h_4 = h_4\ (1 - C\ D)^3$, etc., et $Y_2 - Y = D$, $Y_3 - Y. = 2\ D$, $Y_4 - Y. = 3\ D$, $Y_5 - Y. = 4\ D$, etc., d'où l'on voit que les hauteurs croissant en progression arithmétique, les densités de l'air décroissent en progression géométrique (n° 230).

Une hauteur quelconque donnera $Y_n - Y. = nD$, $h_n = h.(1 - CD)^n$, d'où $n = \frac{\log h^n - \log h.}{\log (1 - CD)}$,

d'où $Y_n - Y.$ ou $X = -\frac{D\ (\log h. - \log h_n)}{\log (1 - CD)}$.

En développant $\log\ (1 - C\ D)$, et supposant D infiniment petit, il vient $X = \frac{m}{C}\ (\log h. - \log h_n)$.

Cette équation indique que X ou la différence des deux stations, est proportionnelle à la différence des logarithmes des deux hauteurs du baromètre dans ces deux stations. Il ne reste que la détermination de C : m est un nombre constant, c'est le module des tables logarithmiques : il est égal à 2,302585.

Dans le commencement de cette note, on a supposé d ou la densité de l'air, proportionnelle à la hauteur du baromètre, ainsi $d = C\ h.$ Le

coefficient C sera donc connu si la densité de l'air, rapportée au mercure, et si la hauteur du baromètre sont connues. MM. Biot et Arago ont trouvé à Paris $d = \frac{1}{10463,0}$ sous la pression $0,^{m}76$, d'où $\frac{m}{C} = 18336^{m}$. La formule devient $X = 18336^{m}$. Log $\frac{H}{h}$. (On remplace H_1 et h_n par H et h.)

[illegible]ns.

Latitude. Le coefficient C [illegible] la latitude, la pesanteur croissant de l'équateur aux pô[illegible]. Si elle est l'unité à la latitude de 45°, elle sera 1 — 0,[illegible] Ψ pour la latitude Ψ; mais la densité de l'air, pour une [illegible]eur $0^{m},76$, est proportionnelle à la pesanteur. C croîtra e[illegible] le même rapport; il sera à la latitude Ψ,

$C\,(1 - 0,00284 \cos 2\,\Psi)$ et la formule générale deviendra

$$X = \frac{m}{C\,(1 - 0,00284 \cos 2\,\Psi)} \log \frac{H}{h}$$ ou en développant et en se bornant aux deux premiers termes

$$X = \frac{m}{C}\,(1 + 0,00284 \cos 2\,\Psi) \log \frac{H}{h}\Big)$$

Température. Les densités d'une masse d'air sont réciproques aux volumes qu'elle occupe à différentes températures sous la même pression, d'où l'on voit que la distance X des deux stations sera trop petite dans le rapport de 1 à $1 + 0,00375\,t$. Il faudra donc multiplier X par $1 + 0,00375\,t$.

Vapeur d'eau. Le rapport entre la densité de la vapeur et celle de l'air, a été trouvé 10 à 16 n° 102. D'après cela, l'air humide doit être plus léger que l'air parfaitement sec. Si p est le poids de la colonne d'air sec, à la pression h., le poids de la même colonne d'air humide sera moindre dans un rapport que nous allons déterminer. Soit f la force élastique de la vapeur, celle de l'air sec sera $h - f$: le poids total sera

$$p\left(\frac{h-f}{h}\right) + \frac{p\,f}{h}\,\frac{10}{16} \text{ ou } p\left(\frac{h - \frac{3}{8}f}{h}\right),$$ d'où le rapport des

poids devient : $\frac{1}{1-\frac{3}{8}\frac{f}{h}}$. C'est par ce nombre qu'il faut multiplier X, on aura donc

$$X = 18336^{m} \frac{(1+0{,}00284\cos 2\Psi)}{1-\frac{3}{8}\cdot\frac{f}{h}} \log\frac{H}{h}\ (1+0{,}00375\,t).$$

Les hauteurs h et H sont censées réduites à zéro. On sait faire ces réductions d'après le n° 235.

Remarquons qu'au lieu du coefficient $\frac{1+0{,}00375\,t}{1-\frac{3}{8}\frac{f}{h}}$, on peut substituer $1+\frac{2\,(T+t)}{1000}$, ce qui revient à remplacer 0,00375 par 0,00400 et à négliger $1-\frac{3}{8}\frac{f}{h}$. Il résulte de là $1+0{,}004\,t$ ou $1+\frac{t}{250}$; mais la température n'est pas uniforme ; elle décroît à mesure qu'on s'élève, et comme le décroissement suit à peu près une progression arithmétique, on prend la moyenne des températures de chaque station. On a donc $1+\frac{(T+t)}{2.\ 250}$ ou $1+\frac{2\,(T+t)}{1000}$.

La formule est maintenant $X = 18336^{m}\ (1+0{,}00284\cos 2\ \Psi)$ $\left(1+\frac{2(T+t)}{1000}\right)\log\frac{H}{h}$.

Il y a encore une correction ; elle est relative au décroissement de la pesanteur dans la verticale.

M. de Laplace a donné la formule suivante (4e vol., *Mécan. céleste*), dans laquelle on tient compte de toutes les corrections.

$$X = 18336^{m}\ (1+0{,}00284\ \cos 2\ \Psi)\left(1+\frac{2\,(T+t)}{1000}\right)\left[1+\frac{X}{r}\right)$$
$$\log\frac{H}{h}+\frac{X}{r}\ 0{,}86859\Big]$$

r étant le rayon de la terre, on mettrait dans le second membre, X déterminé dans la supposition de $r = 0$.

Le milieu du jour (midi) a été indiqué par M. Ramond, comme le moment le plus propre aux observations barométriques. Il faut éviter

les temps où la température et la hauteur barométrique sont très-variables, où l'agitation de l'air est considérable.

Il convient ainsi de laisser le baromètre une journée dans la station où l'on doit prendre la hauteur, afin qu'il acquiert la température de l'air.

Il faut isoler le baromètre autant que possible, ne pas le placer dans une gorge de montagne, etc.

Les soins à prendre pour apporter de l'exactitude dans les observations barométriques sont très-[illegible]. On les trouvera indiqués avec beaucoup de détails dans les [illegible] de M. Ramond, sur la formule barométrique.

Voyez en outre le Mém[illegible]. Oltmanns ; les Mémoires de M. Delcros ; *Annales de* [illegible]*hysique*, tome 8 ; un Mémoire à M. Navier, même jou[illegible].

ADDITIONS.

Sur l'écoulement des liquides, p. 52.

La table des *Annales de physique et de chimie*, dans lesquelles sont insérés les principaux travaux des savans français, sur tout ce qui a rapport aux sciences physiques et chimiques, n'étant pas faite, on concevra facilement que j'ai pu omettre plusieurs mémoires importans. Je tâcherai de réparer cette omission en partie dans les additions.

M. Girard a lu à l'Académie plusieurs mémoires sur l'écoulement des liquides, desquels ils résulte 1°, sous une charge quelconque, un volume d'eau déterminé s'écoule pendant le même nombre de secondes, soit que l'extrémité par laquelle s'échappe le liquide, plonge dans l'air, soit qu'elle plonge dans le liquide.

2°. En général, dans les tubes susceptibles d'être mouillés, une élévation de température augmente la quantité de liquide écoulé dans un temps donné. Par exemple, l'eau s'écoule à 84 degrés quatre fois plus vite qu'à zéro.

3°. Les divers liquides n'ont pas des vitesses égales à la même température. Le rapport des vitesses varie avec les températures. L'eau

est de tous les liquides celui qui, à égale température, donne le plus grand produit. (Voyez *An. ch. et ph.*, t. 1 et 4.)

M. Dubuat et M. Gerstner avaient fait des expériences analogues; mais les conséquences auxquelles M. Girard est arrivé, sont beaucoup plus étendues que celles de ces savans. (*Voyez* les mémoires cités.)

Voyez aussi *Annales de chimie et de physique* pour plusieurs mémoires sur l'écoulement des gaz, par MM. Girard et Cagnard Latour; par M. Navier, par M. Faraday.

Sur les capacités des gaz.

Nous avons rapporté, page 183, que M. Haycraff avait trouvé que tous les gaz simples ou composés possèdent la même capacité pour la chaleur. MM. Larive et Marcet viennent d'obtenir le même résultat par des procédés différens. *Voyez* les *Annales de chimie et de physique*, année 1827, pour connaître les procédés imaginés par ces savans distingués.

Sur la distribution du magnétisme.

Nous avons omis, en parlant de la distribution du magnétisme, de mentionner les expériences de M. Becquerel, sur des fils d'acier très-fins. Il résulte des expériences de ce physicien, que la distribution du magnétisme dans les fils très-fins, est la même que celle qu'avait obtenue Coulomb, pour des fils assez gros; et qu'elle satisfait aux équations données par M. Biot. Nous ajouterons que M. Becquerel s'est procuré des fils d'acier extrêmement fins en substituant dans le procédé de M. Wollaston le mercure à l'acide nitrique. (*Annales de chimie et de physique*, t. 22.) (*Voyez* la divisibilité.)

M. Becquerel a publié pendant l'impression de cet ouvrage un nouveau mémoire sur l'électricité dégagée dans les actions chimiques. (*Ann. de chim. et de phys.*, t. 35.)

On trouva dans ce mémoire un résumé de ce qui a été fait sur ce sujet par M. Davy, et des nouveaux faits ajoutés par M. Becquerel.

Sur l'acoustique.

M. Savart a publié dans les *Ann. de physique et de chimie*, t. 32,

un mémoire sur la voix des oiseaux, pour lequel ce savant a fait un grand nombre de dissections.

Nous ne connaissions pas ce mémoire au moment où nous avons rédigé l'article acoustique. Nous engageons le lecteur à en prendre connaissance. Il y trouvera beaucoup de détails importans sur l'organe vocal des oiseaux, etc., etc.

Voyez dans le même journal, t. 15, un mémoire de M. de Humboldt sur l'accroissement nocturne de l'intensité du son; un mémoire de M. Wollaston, t. 16, sur les [illegible] quels certaines oreilles sont insensibles.

1°. *Sur les d* [illegible] *à diverses pressions.*

Présenté à l'Académie en [illegible] *Ann. ch. et phys.*, mars et avril

De ce travail il résulte que [illegible] gaz sont plus compressibles que ne l'indique la loi de Mariotte; d'après cette loi, un volume déterminé de gaz étant soumis successivement à diverses pressions, occupe des volumes qui sont en raison inverse de ces pressions (n° 108). Les expériences que j'ai faites démontrent que les volumes obtenus réellement sont toujours plus petits.

Dans les premières expériences, deux éprouvettes calibrées et remplies, la première d'air atmosphérique, la seconde d'un autre gaz, étaient renfermées dans un tube de verre très-épais et rempli d'eau : à ce tube était adapté un cylindre en cuivre dans l'intérieur duquel se mouvait un piston en cuivre, qu'on enfonçait plus ou moins pour avoir une pression plus ou moins forte. En faisant toutes les corrections qu'exigent de semblables expériences, et en calculant les pressions par la diminution de volume, le gaz ammoniacal, l'acide sulfureux, le cyanogène, l'acide hydro-sulfurique, etc., donnent des pressions plus fortes que l'air. Ce dernier gaz donne des pressions plus fortes que l'hydrogène.

Ce résultat est contraire à tout ce qu'on savait; puisque d'après la loi de Mariotte, dans tous les calculs relatifs aux gaz, les gaz sont supposés également compressibles.

Pour qu'on puisse se faire une idée de la différence que présentent

les résultats calculés avec les résultats de l'expérience, nous rapporterons les pressions fournies par le gaz ammoniacal parfaitement dépouillé d'eau et de matière étrangère, et l'air atmosphérique également pur et desséché.

Pressions indiquées par le gaz ammoniacal.	Pressions indiquées par l'air.
1m,850	1m,819
2,663	2,582
4,132	3,865

Avec le premier appareil il fallait prendre un gaz pour terme de comparaison. Un second appareil représenté dans la fig. 413, donne la pression absolue. La partie *A* n'est autre que l'ancien appareil ; la partie *B* communique avec la partie *A* par le tube latéral *E*. Le mercure contenu dans le tube *B* s'élève dans le tube *c d*, et indique la pression. L'avantage de cette manière d'opérer est de donner la pression absolue avec une précision qui est toujours la même, quelle que soit la pression. Il faut tenir compte de la compression du mercure, quoiqu'à la vérité l'influence de cette compression soit bien légère. Je la connais d'après mes propres expériences. Il est surtout bien essentiel de prendre la température de la colonne de mercure. On a cette température à l'aide de deux thermomètres placés dans la colonne même ; de plus un thermomètre ouvert est renfermé dans le tube *B*. Les résultats fournis par cet appareil permettent de tracer la courbe de chaque gaz.

Le même appareil servira à vérifier les nombreuses expériences que j'ai faites sur la compression des principaux liquides et de quelques corps solides, et dans lesquelles j'ai trouvé une compression décroissante pour tous les liquides.

Le piezomètre employé par Canton est sujet à plusieurs inconvéniens. Le piezomètre dont je me suis servi est représenté dans la figure 38 : comme le liquide de l'intérieur du tube est séparé, par l'air du réservoir *h*, du liquide environnant, on n'a pas à craindre la pénétration du petit index *m* de mercure, pénétration qui a souvent lieu, et dont il est impossible de tenir compte dans l'appareil de Canton, puisque dans cet appareil l'index n'est pas séparé du liquide environnant.

Procédé pour mesurer la chaleur dégagée dans la compression des liquides.

Ce moyen consiste à comprimer fortement le liquide qu'on veut soumettre à l'épreuve de l'expérience, à le laisser plonger dans une masse considérable d'eau froide, assez long-temps pour qu'il en prenne la température, et à voir le froid qu'il produit par son retour à la pression de l'atmosphère. [illegible] l, produit par l'expansion, est évidemment égal à la c[illegible] par la compression du même liquide. (Ce procédé à [illegible] é à l'Académie.)

J'ai trouvé, de plus, q[illegible] fois qu'on décompose un sel par un métal il y a décom[illegible] u, quand le métal précipité et le métal précipitant sont [illegible] ctromoteurs, et que dans le cas contraire, l'eau n'est [illegible] osée à moins qu'on n'élève la température ; 2° j'ai proposé [illegible] naître l'influence des températures élevées, sur l'énergie du magnétisme, une aiguille qui porte elle-même un petit thermomètre métallique. (*Société philomatique.*)

TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
Notions préliminaires sur la matière, les lois du mouvement et la chute des corps..	1
PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.	*id.*
De l'étendue.	2
De l'impénétrabilité.	*id.*
De la porosité.	3
De la divisibilité.	4
De l'inertie.	6
De l'attraction.	*id.*
De la pesanteur.	8
Du mouvement uniforme et varié.	9
Application à la pesanteur.	11
Du mouvement curviligne.	18
De la force centrifuge.	20
Du pendule..	25
Application du pendule à la pesanteur.	28
Application du pendule aux horloges.	31
De l'équilibre produit par la composition des forces.	33
De quelques machines simples..	38
Du levier, de la balance.	39
Du plan incliné.	42
De la vis.	*id.*
De la poulie.	43
Du treuil.	45
Des propriétés générales des fluides.	46

Pages.
De l'équilibre des fluides incompressibles. . . . . id.
Compressibilité des liquides. 50
Mouvement des liquides. 52
Du bélier hydraulique. 57
De quelques instrumens communément employés. . . 58
Du vernier. . . . . id.
De la vis. 59
Du sphéromètre. 60
Du comparateur. 62
DE LA CHALEUR. 65
Explication détaillée de la construction du thermomètre. id.
Thermomètre différentiel. 72
Propriétés les plus générales de la chaleur. 75
DES DILATATIONS. 78
Dilatation des gaz. . . . . id.
— des liquides. 82
— des solides. 86
Pyromètres. 95
Pendule compensateur. 99
Thermomètre à spirale. 102
CHANGEMENT D'ÉTAT DES CORPS. 104
Conversion des liquides en vapeurs. 108
Du froid produit par la fusion, ou des mélanges réfrigérens. 114
Du froid produit par l'évaporation. 117
DES VAPEURS. 121
Forces élastiques. . . . . id.
Densités des vapeurs. 130
Loi de Mariotte. 139
Liquéfaction de gaz. 140
Mélange des gaz. 143
Mélange des gaz et des vapeurs. 144

Pages.
De l'évaporation. 151
DE L'HYGROMÉTRIE. 156
Différens hygromètres. . . . . *id.*
Capacités des corps pour la chaleur. 172
Méthode du calorimètre de glace. . . . . *id.*
Méthode des mélanges. 174
Méthode du refroidissement. 177
Capacités des gaz.. 181
Lois du refroidissement. 184
Refroidissement dans le vide. 187
Refroidissement dans l'air et dans les gaz. 188
De la réflexion et du rayonnement de la chaleur; de plusieurs phénomènes qui y ont rapport. 192
De la rosée. 201
Théorie de la formation de la rosée. 203
Phénomènes qui ont du rapport avec la rosée. . . . 205
Propagation de la chaleur dans l'intérieur des corps; loi de cette propagation; détermination de la conductibilité intérieure. 208
De la conductibilité des fluides.. 216
Des densités. 218
Densités des gaz. 219
Des aérostats. 222
Densités des liquides.. 224
Densités des corps solides. 228
Des aéromètres.. 230
Du maximum de densité de l'eau. 237
Détermination de la capacité des vases. 240
DE L'ATMOSPHÈRE. 246
Gazomètres. (*Voy.* la fin de l'ouvrage, *chaleur animale*). 249
Du syphon. 251
Du décroissement de la densité de l'atmosphère. . . 253

Pages.
DU BAROMÈTRE. 255
Des différentes espèces de baromètres. 256
Du baromètre à cuvette. . . . . id.
Du baromètre à syphon. 262
Du baromètre à cadran. 264
De la machine pneumatique. 267
Des machines à compression. 276
Du fusil à vent. 280
De la fontaine de compression. 281
DES POMPES. 282
De la fontaine intermittente. 286
De la fontaine de héron. 289
Presse hydraulique. 290
MACHINES A VAPEURS. 292
Machine de Newcommen et de Cawley (à simple effet). 293
Machine de Watt (basse pression). 296
Machine de Woolf (à moyenne pression et à détente). . 298
Machines à haute pression. 301
Modérateur. 302
Piston. 305
Soupapes pour le passage de la vapeur. . . . . id.
Soupapes de sûreté. . . . . id.
Chaudières. 306
Manomètre. 307
Balancier. 308
Calcul des effets dynamiques. 311
Bateaux à vapeur 315
Voitures à vapeur. . . . . id.
Machines mues par l'acide carbonique. 318
DE L'ÉLECTRICITÉ. 321
Notions préliminaires. . . . . id.
Des lois que suivent les actions électriques. 330

Pages.
Construction de la balance électrique. 330
Vérification de la loi. 335
De la perte de l'électricité. 342
De la perte par l'air. 343
Perte par les supports. 350
Des machines électriques. 355
Dispositions de l'électricité à la surface des corps isolés. 359
Distribution du fluide électrique sur plusieurs corps en contact. 370
Des électricités dissimulées. De leur séparation à distance. 373
De l'électrophore. 377
De la lampe électrique. 379
Des condensateurs. 381
De la bouteille de Leyde. 391
Charge par cascade. 395
Des batteries électriques. 396
Effets mécaniques de l'électricité. 397
Des électroscopes. 398
Électromètre condensateur. 402
De la lumière électrique. 403
Électricité atmosphérique. 406
Des paratonnerres. 410
Du choc en retour. 414
DE L'ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR LE CONTACT. 416
Construction et théorie de la pile. 420
Diverses piles. 423
Piles sèches. 425
Des piles secondaires. 426
Effets de la pile. 427
Effets physiques. . . . . *id.*

Pages.
Effets chimiques. 432
Effets dynamiques. 440
Phénomènes relatifs à la pile. . . . . . *id.*
Des substances qui ont, par rapport à l'électricité galvanique, une faculté conductrice particulière. 442
Expériences thermo-électriques. 444
Électricité développée [illegible] **sion.** 446
De l'électricité développ [illegible] **phénomènes chimiques.** 447
De l'électricité développé [illegible] **haleur.** 449
MAGNÉTISME. . . . [illegible] 453
Propriétés générales des [illegible] . . . . . *id.*
De la loi que suivent les ac [illegible] **gnétiques.** 458
Des procédés d'aimantation. 462
Méthode de la simple touche. . . . . *id.*
Méthode de la double touche. 463
Des armatures. 465
Distribution du magnétisme. 467
Action du globe sur les aimans. 471
Déclinaison. 472
De l'inclinaison. 477
De l'intensité de l'action magnétique du globe. . . . 479
De l'action réciproque des aimans et des différens corps. 485
PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-DYNAMIQUES. . . . 490
1er fait. Action directrice. . . . . *id.*
2e fait. Action répulsive et attractive. 492
Attraction et répulsion des courans électriques. . . 493
Rotation continue. 496
De l'aimantation produite par les courans électriques. 500
De l'action de la terre sur les conducteurs voltaïques. . 501
Description d'un appareil électro-dynamique. . . . 504
Attractions et répulsions des courans angulaires. . . 507

Pages.
Conducteurs astatiques. 510
Action de deux courans parallèles. 512
Conducteurs sinueux. 513
Rotation continue déterminée par la terre, etc. . . . 514
Nullité de l'action d'un courant circulaire sur un conducteur mobile autour d'un axe passant par son centre, et fermé ou ayant ses extrémités dans cet axe. . 518
Direction imprimée par la terre. . . . . *id.*
Hélices et aimans. 520
Du multiplicateur. 521
Des poissons électriques. 523
DE L'OPTIQUE. 527
Propriétés de la lumière. . . . . *id.*
Transmission. . . . . *id.*
Vitesse. 528
Ombre. 529
Décroissement de l'intensité. . . . . *id.*
De l'influence de l'inclinaison de la surface. . . . . *id.*
Passage à travers les milieux diaphanes. 530
Comparaison des intensités de deux lumières. . . . *id.*
Sources de la lumière. 531
Réflexion de la lumière. 532
Miroir plan. 534
Miroirs courbes. 535
Détermination des foyers. 540
Emploi des miroirs pour exciter la combustion. . . 541
De la réfraction. 542
Loi de la réfraction. 543
Réfraction dans les milieux terminés par des surfaces courbes. 545
Lentilles. 548
Détermination des foyers. 549

Pages.

Images produites par la réfraction à travers les lentilles. 552
Lentilles en échelons. 557
Indices de réfraction; puissances réfractives; pouvoirs réfringens. 558
Mirage. 567
Décomposition de la lum 569
Inégale réflexibilité des r 574
Propriétés calorifiques des . . . . . *id.*
Propriétés chimiques des rayons. 576
Propriétés magnétiques. 577
Propriétés éclairantes. . . . . *id.*
DE LA VISION. 579
Structure de l'œil. . . . . *id.*
Marche des rayons dans l'œil. 582
Netteté de la vision à différentes distances. 583
Unité de l'impression produite dans les deux yeux. . 586
Usage des lentilles pour remédier au défaut de la vue chez les presbytes et les miopes. 588
Appréciation de la distance. 589
Estimation de la grandeur. 590
Illusions d'optique. 591
De l'arc-en-ciel. 593
Calculs relatifs à l'arc-en-ciel. 596
Largeur des deux arcs. 599
DES PRINCIPAUX INSTRUMENS D'OPTIQUE. . 601
Loupe ou microscope simple. . . . . *id.*
Microscope solaire. 603
Mégascope. 604
Chambre obscure. 605
Microscope composé. 606
Lunette astronomique. 611

Pages.
Lunette terrestre, ou lunette à quatre verres. 613
Lunette de Galilée. 615
Télescopes. 616
Microscope catadioptique. 620
Généralités sur les lunettes. 621
Aberration de sphéricité. 622
Aberration de réfrangibilité. . . . . *id.*
Lunettes achromatiques. 623
Instrumens fondés sur la réflexion de la lumière. . . 627
Goniomètre de Malus. . . . . *id.*
Goniomètre de Wollaston. 628
Chambre claire. 929
DOUBLE RÉFRACTION. 633
Application de la double réfraction. 645
Micromètre. . . . . *id.*
Mesure du grossissement dans les instrumens d'optique. 649
DE LA POLARISATION DE LA LUMIÈRE. 650
Système des ondulations. 658
Principe des interférences. 661
Explication de la réflexion et de la réfraction de la lumière dans l'hypothèse des ondulations. 667
DE LA DIFFRACTION. 670
Histoire expérimentale des anneaux colorées. 677
De l'héliostat. 687
ACOUSTIQUE. 690
Vitesse du son. 693
Propagation du son. 700
Réflexion du son. 703
Lois des vibrations des corps sonores. 704
Expériences de Sauveur. 706
Expérience de Tartini. 708
Vibrations des verges solides droites ou courbes. . . *id*

Des surfaces vibrantes. . . . . .
Instrumens à vent. . . . . .
Théorie des instrumens à vent. . . . . .
Instrumens à anches. . . . . .
Communication des mouvemens vibratoires. . . . .
Organe de l'ouie. . . . . .
De la voix. . . . . .
MÉTÉOROLOGIE. . . . . .
De la pluie et des nuages. . . . . .
De la rosée. . . . . .
De la gelée blanche. . . . . .
Des brouillards. . . . . .
De la neige. . . . . .
De la grêle. . . . . .
Trombe. . . . . .
Halos. . . . . .
Des aérolithes. . . . . .
Aurore boréale. . . . . .
Électricité atmosphérique. . . . . .
Des vents. . . . . .
Températures des différens climats. . . . . .
Des lignes isothermes. . . . . .
Températures des deux hémisphères. . . . . .
Températures du globe à diverses profondeurs. . .
Froid des lieux élevés. . . . . .
Neiges perpétuelles. . . . . .
Températures des mers. . . . . .
Température moyenne du pôle. . . . . .
Sources de chaleur. . . . . .
— Rayons solaires. . . . . .
— Percussion. . . . . .
— Frottement . . . . . .

Pages.
— Changement d'état. 781
— Électricité. . . . . *id.*
— Combinaisons. . . . . *id.*
— Combustion. 785
De la flamme. 787
Toiles métalliques. 788
Lampe des mineurs. 789
Chalumeau. 790
Influence de l'état des corps solides pour déterminer la combinaison des gaz. 791
Du froid dans la dilatation. 792
SOURCES DE LA CHALEUR ANIMALE. 795
— Chaleur dégagée dans la combustion du carbone et de l'hydrogène. 801
— Description de l'appareil employé pour la mesure de la chaleur animale. 805
— Respiration. 808
— Rapport entre la chaleur due à la respiration et à la chaleur totale émise par les animaux. 816
Notes sur différens objets. 819
Longueur du pendule. . . . . *id.*
Tubes capillaires. 820
Calculs sur les hautes températures. 824
Sur le froid par l'évaporation. 828
Sur les forces élastiques des vapeurs. 829
Sur les lois du refroidissement. . . . . *id.*
Sur la conductibilité. 833
Additions.
Mesure des hauteurs par le baromètre. 834
Sur l'écoulement des liquides 838
Sur la capacité des gaz pour la chaleur. . . . . *id.*
Sur le magnétisme et l'électricité. . . . . *id.*

Sur la voix. . . . . .
Sur les densités des gaz. . . . . .
Sur la chaleur dégagée dans la compression des liquid

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

[redacted]

ERRATA.

Page 19, ligne 11, commesurables, *lisez* commensurables.
46, ligne 13, liquides, *lisez* fluides.
52, ligne 25, incompressibles, *lisez* liquides.
67, Claussergues, *lisez* Flaugergues. *Ajoutez* que M. Bellam a fixé le premier l'attention des physiciens sur la variation du zéro du thermomètre à mercure.
69, en note, *P*, *lisez D*.
72, ligne 5, propre à, *ajoutez* faire.
116, ligne 26, supérieur à 20 degrés, *lisez* à — 20.
136, ligne 22, les vapeurs, *lisez* les densités des.
142, ligne 6, M. Perkins, *lisez* M. Brunel.
151, ligne 17, n° 91, *lisez* 114.
170, ligne 25, le poids de, *lisez* le poids dans.
177, *lisez* méthode du réfroidissement.
208, 1re ligne, citée, *lisez* citée n° 168.
209, ligne 11, 155, *lisez* 153.
214. ligne 32, *lisez* 981.
218, ligne 7, n° 7, *lisez* n° 8.
219. ligne 27, maximum de densité, *ajoutez* de l'eau.
226, ligne 26, déplacé, *ajoutez* n° 44.
237, ligne 7, *effacez* : *Voyez* les additions.
253, ligne 2, verser de, *ajoutez* nouveau.
259, ligne 23, n° 44, *lisez* 42.
284, ligne 14, *F*, *lisez F'*.
285, dernière ligne, *c d*, *lisez c f*.
328, *effacez* : *Voyez* les additions.
345, ligne 20, $\frac{1}{1,43}$, *lisez* $\frac{1}{1,43}$.
349, ligne 16, quantité, *ajoutez*, de vapeur.
366, ligne 24, n° 305, *lisez* 306.
389, note, ligne 5. *lisez* d'où $V' = m R = m^2 V$, $R' = m V' = m^3 V$.
400, ligne 25, *L*, *lisez l*.
419, avant dernière ligne, supérieur, *lisez* inférieur.
467, ligne 19, aiguille aimantée, *lisez* aiguille non aimantée.
467, ligne 24, on fixe, *ajoutez* verticalement.
473, ligne 18, de ligne, *lisez* de signe.
484, note, ligne 19, ou tang *i*, *lisez* ou tang *i'*.

627, ligne 1, qui en reste, *lisez* qui en résult

632, ligne 10, *A B C*, *lisez* *A B E*.

636, ligne 8, *fig.* 352, *ajoutez* et dont.

637, ligne 18, sur des, *lisez* sur l'une des.

640, ligne 6, *T E T'*, *lisez* *T F T'*.

644, ligne 18, *a* et *b*, *lisez* *A* et *B*; lig. 20, p rectangle.

653, ligne 27, les sinus, *lisez* le sinus.

656, ligne 8, MM., *lisez* de MM.

667, ligne 28, *C K* et *D L*, *lisez* *G k* et *D ℓ*.

677, ligne 14, celle, *lisez* celui.

680, ligne 2, n° 569, *lisez* 570.

683, ligne 15, *S I*, *lisez* *S i*.

683, ligne 15, *S I*, *lisez* *S i*. Ligne 18, *fig.*

687, ligne 10, n° 572, *lisez* 573.

693, ligne 11, le son, *ajoutez* parcourt.

695, ligne 19, 0m,78, *lisez* 0m,756.

695, ligne 9, après Velter, *ajoutez* donnent.

726, ligne 25, *A B'*, *B D*, *lisez* *A' B'*; *B'* *B' D*.

Fig. 2 bis.

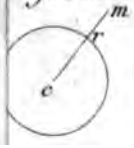


Fig. 5 bis.

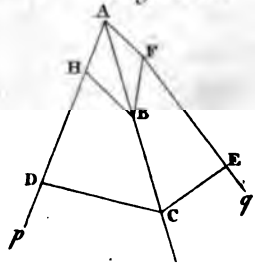


Fig. 1 b

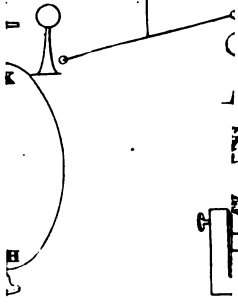


Fig 8

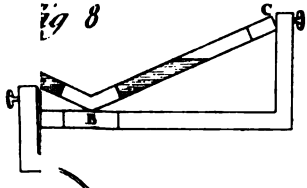


Fig. 11.

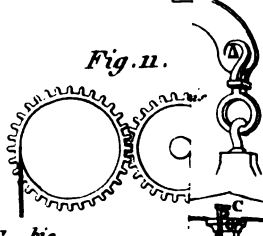


Fig. 11 bis

Fig. 12.

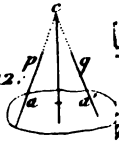
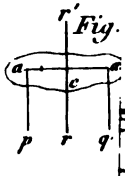
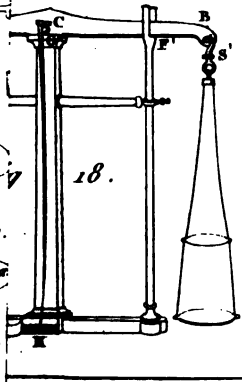


Fig.

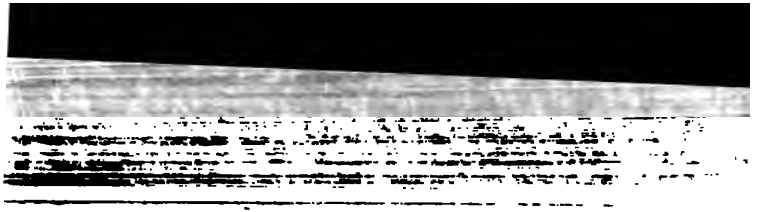


18.



Adam Sc

627, ligne 1, qui en reste, *lisez* qui en résulte
632, ligne 10, *A B C*, *lisez A B E*.
636, ligne 8, *fig.* 352, *ajoutez* et dont.
637, ligne 18, sur des, *lisez* sur l'une des.
640, ligne 6, *T E T'*, *lisez T F T'*.
644, ligne 18, *a* et *b*, *lisez A* et *B*; lig. 20, par rectangle.
653, ligne 27, les sinus, *lisez* le sinus.
656, ligne 8, MM., *lisez* de MM.
667, ligne 28, *C K* et *D L*, *lisez G k* et *D l*.
677, ligne 14, celle, *lisez* celui.
680, ligne 2, n° 569, *lisez* 570.
683, ligne 15, *S I*, *lisez S i*.
683, ligne 15, *S I*, *lisez S i*. Ligne 18, *fig.* 3
687, ligne 10, n° 572, *lisez* 573.
693, ligne 11, le son, *ajoutez* parcourt.
695, ligne 19, 0m,78, *lisez* 0m,756.
695, ligne 9, après Velter, *ajoutez* donnent.
726, ligne 25, *A B'*, *B D*, *lisez A' B'*; *B' L B' D*.



JTP-13-584

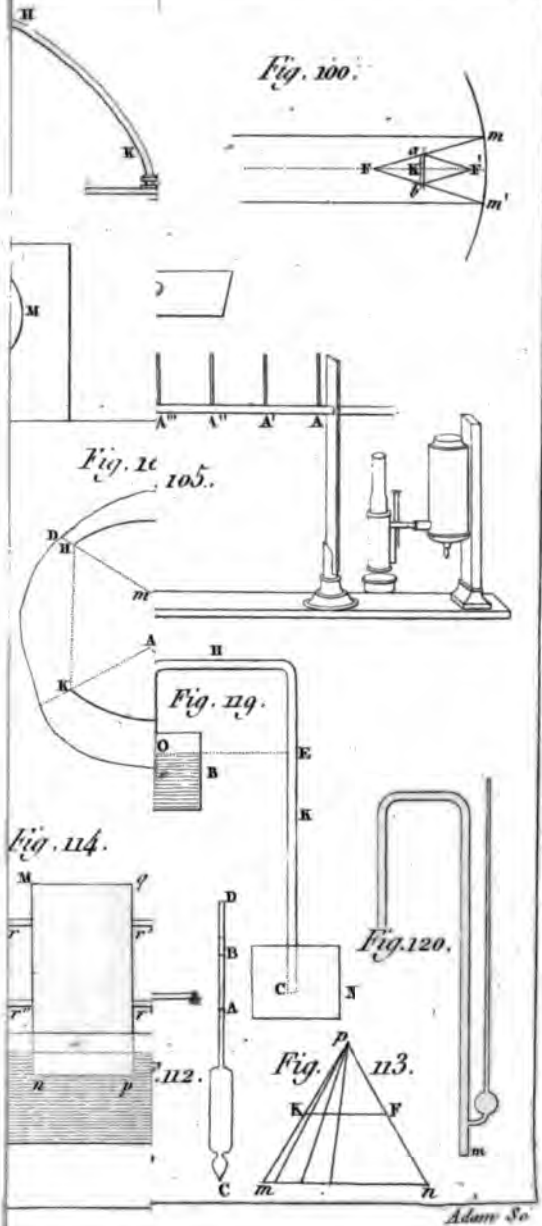
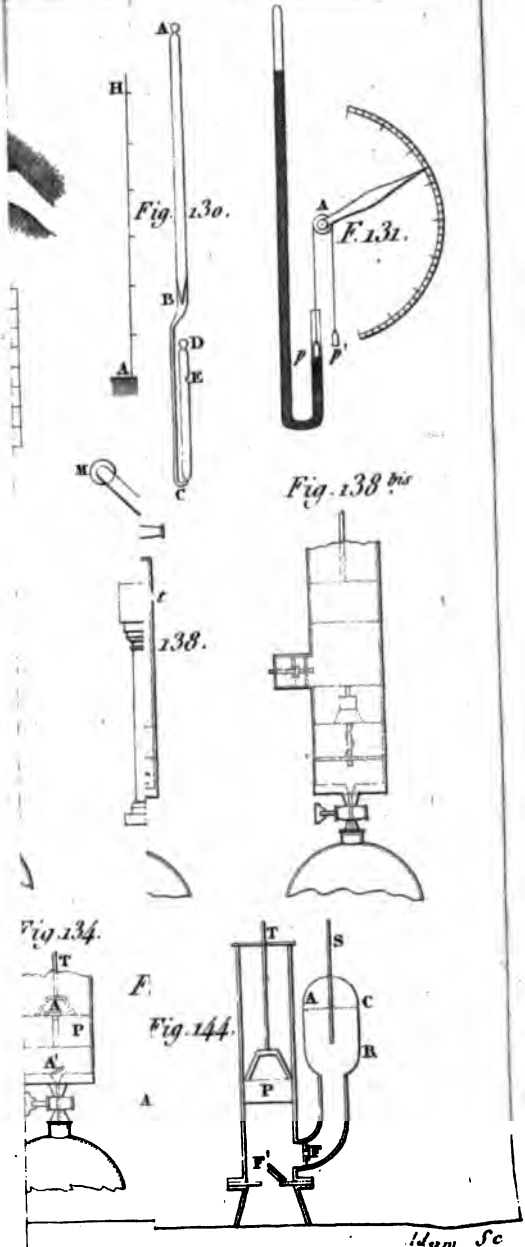
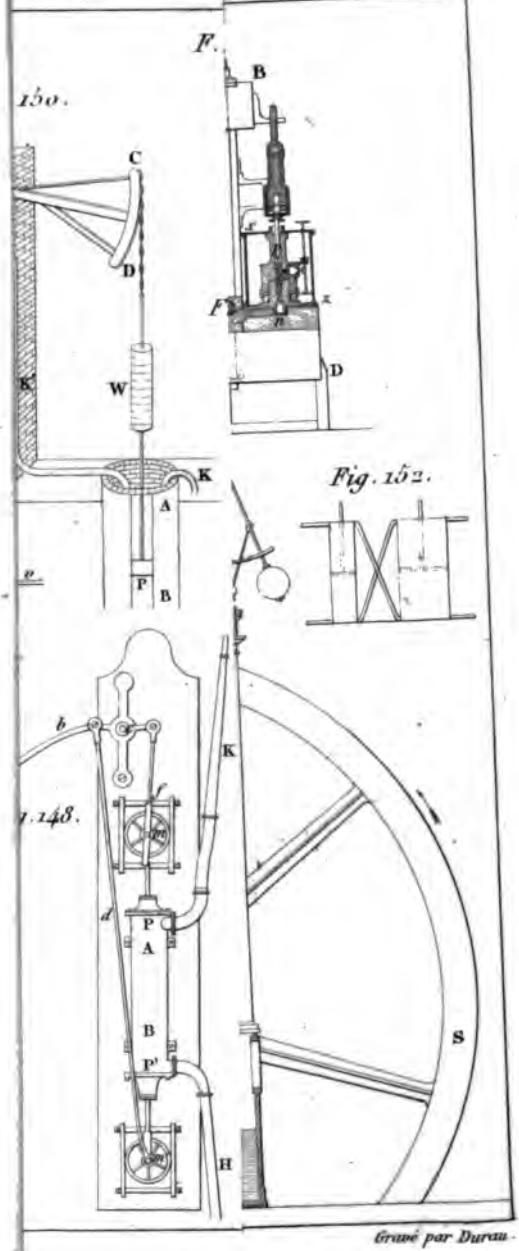


Fig. 100.
Fig. 105.
Fig. 119.
Fig. 114.
Fig. 112.
Fig. 113.
Fig. 120.
Adam Sc

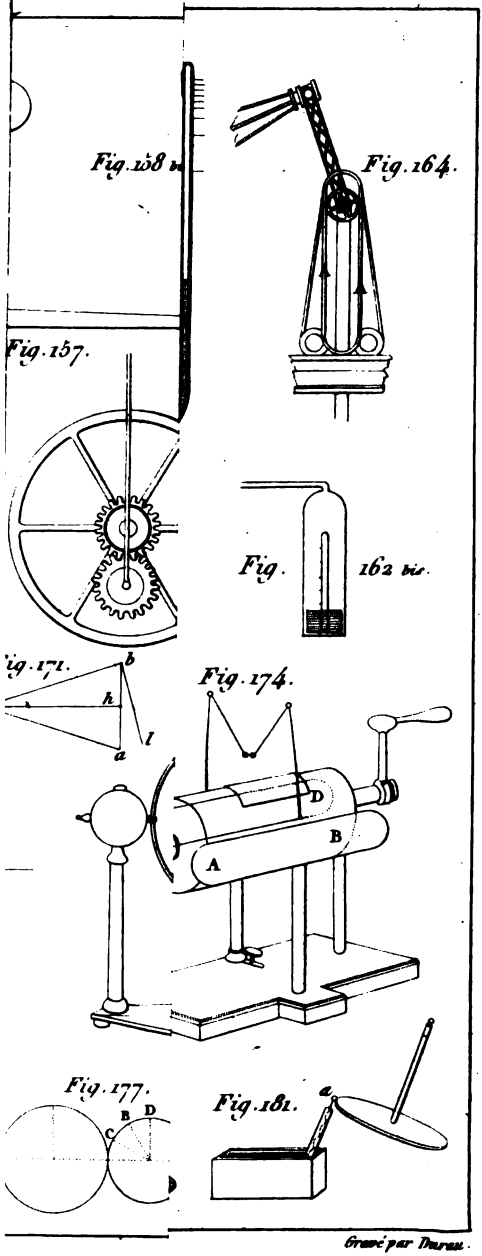
Pl. 6.


A
H
Fig. 130.
B
D
E
A
C
A
F. 131.
P
P'
M
Fig. 138 bis
t
138.
Fig. 134.
T
A
P
A'
A
F.
Fig. 144.
T
S
A
C
R
P
F
F'
Idam Sc



Gravé par Durau.

Pl. 8.



Gravé par Durau.

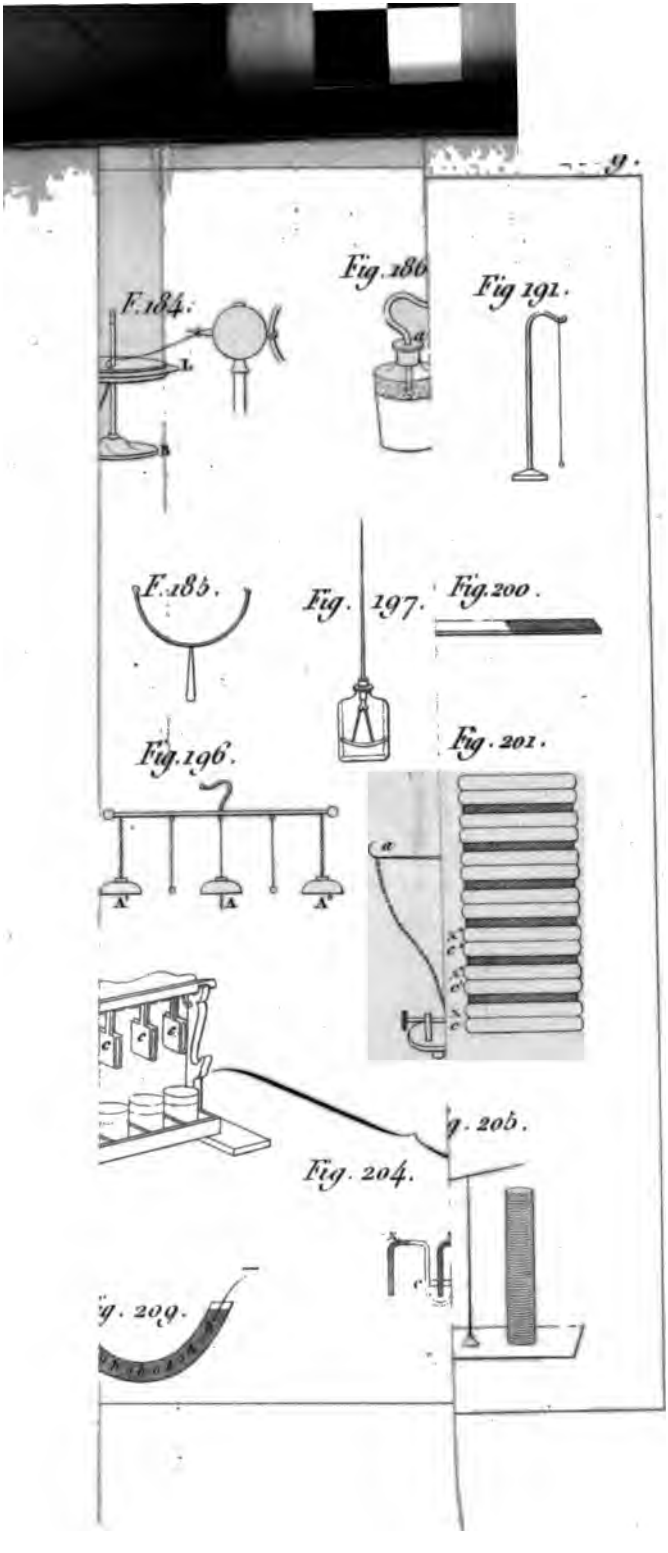

g.
F.184.
L
B
Fig. 186
a
Fig 191.
F.185.
Fig. 197.
Fig. 200.
Fig. 196.
A
A
A
Fig. 201.
a
c
c
c
g. 205.
Fig. 204.
c
g. 209.

Fig. 215.

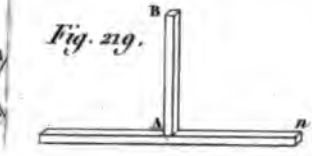
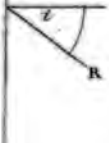


Fig. 219.



F. 233.

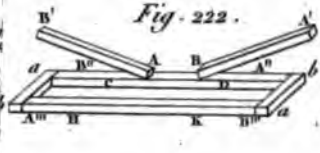


Fig. 222.

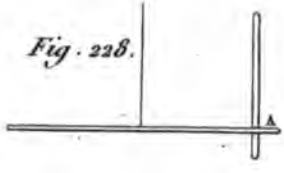


Fig. 228.

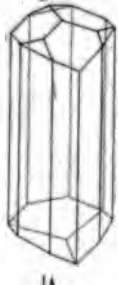


Fig. 216.

Fig. 245.

Fig. 245 bis.

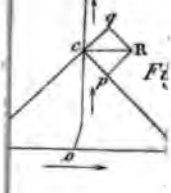


Fig.

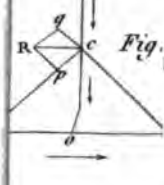
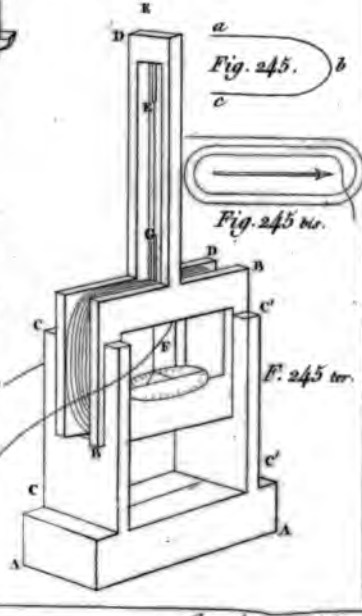


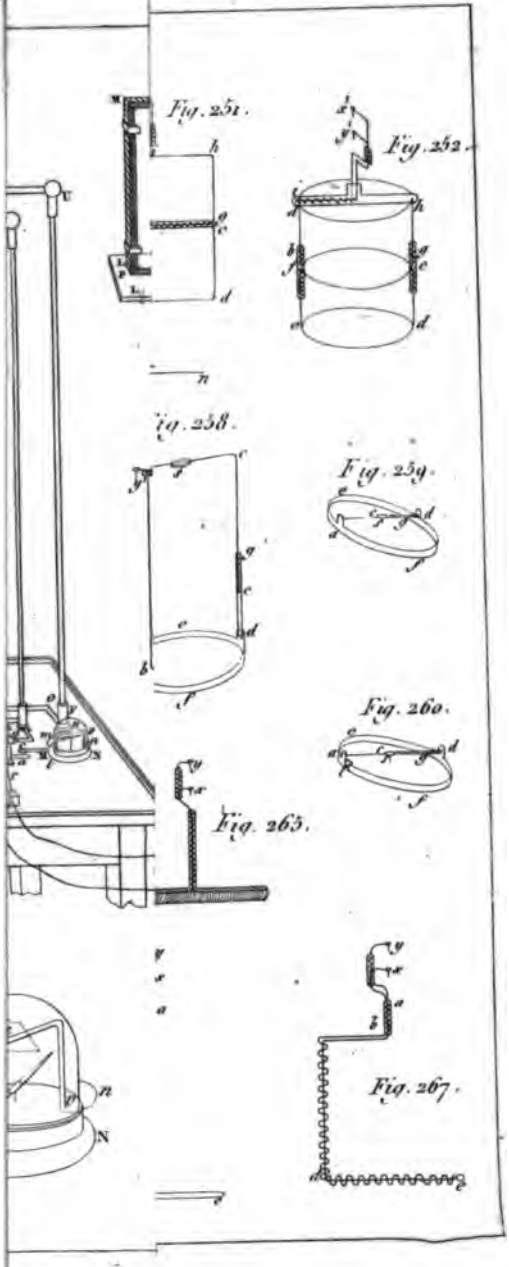
Fig.



F. 245 ter.

Gravé par Adam.

Pl. II.



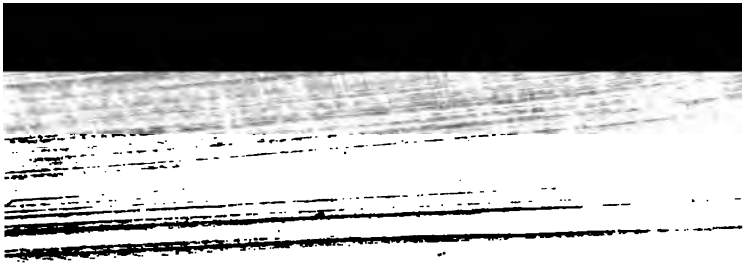


Fig. 278.

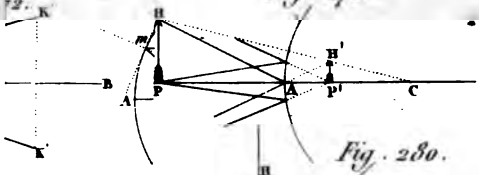
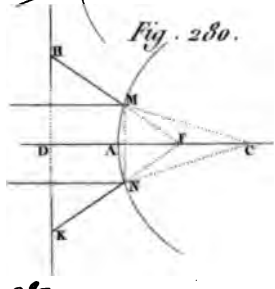


Fig. 280.



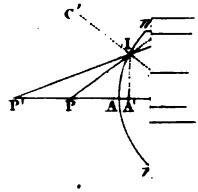


Fig. 285.

Fig. 287.

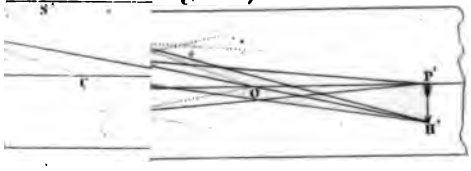


Fig. 289.

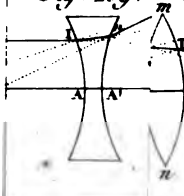


Fig. 292.

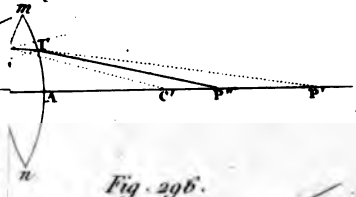


Fig. 296.

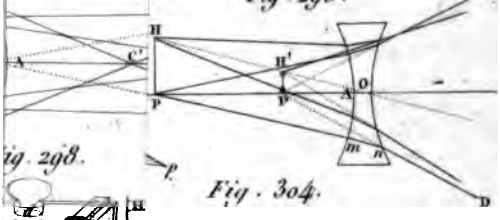


Fig. 298.

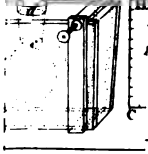


Fig. 304.

Gravé par Adam.

Fig. 32u.

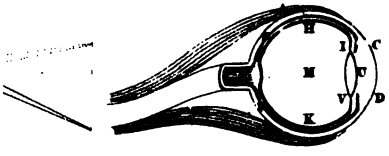


Fig. 322.

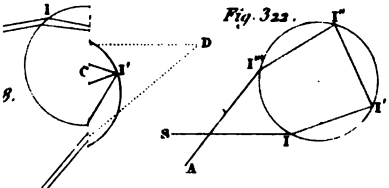


Fig. 328.

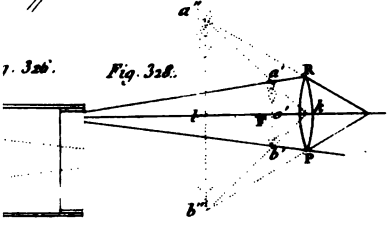
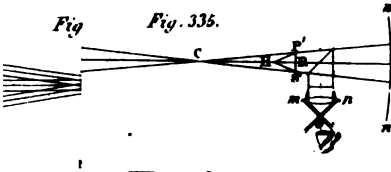


Fig. 335.



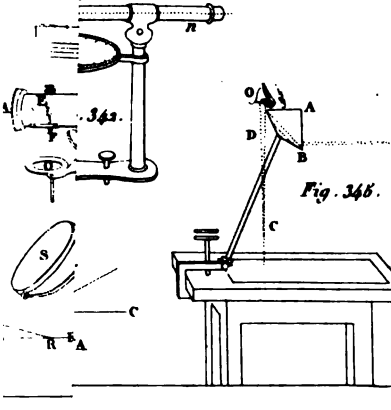


Fig. 346.

Fig. 355.

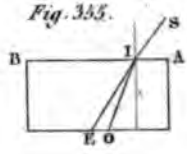


Fig. 360.

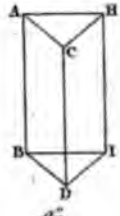


Fig. 370.

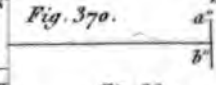


Fig. 361.

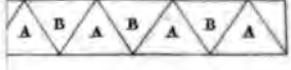
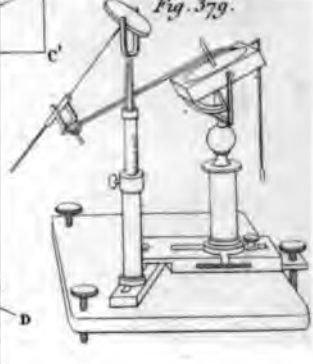
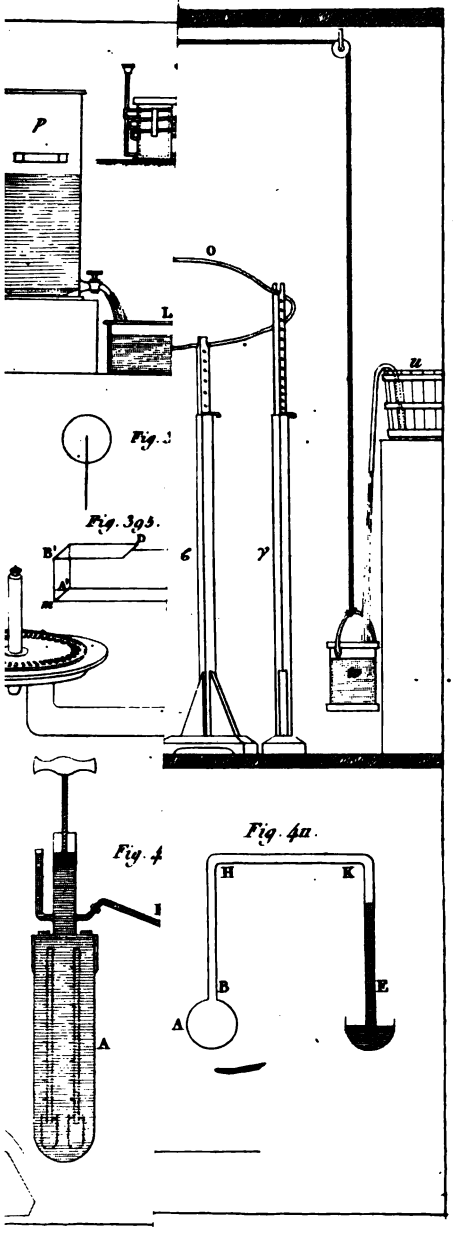


Fig. 379.



Pl. 15.